

**ՌՈՒՍԱՍՏԱՆԻ ԳԱՇՆՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ
ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ**

**ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ
ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ**

ՀԱՅ-ՌՈՒՍԱԿԱՆ (ՍԼԱՎՈՆԱԿԱՆ) ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ԻՆՆԵՐՈՐԴ ՏԱՐԵԿԱՆ ԳԻՏԱԺՈՂՈՎ

3–8 դեկտեմբերի 2014 թ.

Հողվածների ժողովածու

**ԵՐԵՎԱՆ
ՌՀՀ ՀՐԱՏԱՐԱԿՉՈՒԹՅՈՒՆ
2015**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ**

РОССИЙСКО-АРМЯНСКИЙ (СЛАВЯНСКИЙ) УНИВЕРСИТЕТ

**ДЕВЯТАЯ ГОДИЧНАЯ
НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

3–8 декабря 2014 г.

Сборник статей

**ЕРЕВАН
ИЗДАТЕЛЬСТВО РАУ
2015**

УДК 5:06

ББК 22

Г 590

Печатается по решению Ученого совета, НТС и РИС РАУ

Редакционная коллегия:

А.Р. Дарбинян (председатель), П.С. Аветисян (заместитель председателя), Г.З. Саркисян, Э.М. Сандоян, А.П. Григорян, Л.А. Алавердян, С.С. Аветисян, М.Э. Авакян, К.С. Акопян, А.С. Берберян, М.А. Восканян, Г.Г. Геолецян, Г.Г. Григорян, А.К. Егиазарян, Н.И. Кеворкова, В.П. Закарян, Е.Г. Маргарян, Л.С. Меликсетян, К.А. Мирумян, О.Л. Саркисян, С.Г. Оганесян, К.Г. Сардарян, А.А. Симонян, А.М. Суварян, Ф.П. Тохян, А.Г. Тунян, С.Ш. Цагикиян

Г 590 Годичная научная конференция (3–8 декабря 2014 г.): Сборник научных статей: (серия: физико-математические и естественные науки.). – Ер.: Изд-во РАУ, 2015. 176 с.

Сборник печатается по материалам 9-ой Годичной Научной конференции, проведенной в Российско-Армянском (Славянском) университете. Статьи публикуются в алфавитном порядке.

Публикация сборника осуществлена также в соответствии с требованиями ВАК РА к сборникам научных трудов.

УДК 5:06

ББК 22

ISBN 978-9939-67-129-1

© Издательство РАУ, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

МАТЕМАТИКА

Алексанян С.С. Формулы для обращения Мура-Пенроуза двухдиагональных матриц специального вида	7
Aramyan R. A new class of convex bodies with integral representation.....	13
Берберян С.Л. О некоторых достаточных условиях существования угловых граничных значений у гармонических функций	19
Дарбинян А.А., Туманян А.Г. Интерполяция нетеровости и инвариантность индекса	25
Карапетян Г.А. Интегральное представление через дифференциальный оператор	30
Маргарян В.Н. Задача Коши для одного класса слабо гиперболических уравнений	35
Mikilyan M. Aeroelastic stability of rectangular plate in supersonic gas flow	39

ИНФОРМАТИКА

Аветисян С.А., Самвелян М.Э. Карапетян М. Случайная нерегулярная блочно-иерархическая сеть. Алгоритмы вычислений основных свойств	48
Айрапетян Т.Б. Алгоритм векторизации контуров	61
Ваградян В.Г. Определение смысла слова, предложения и текста (На примере восточно-армянского литературного языка)	68
Егиазарян В.С., Нахатакян С.Х., Гаспарян А.В. Методология разработки имитационной системы моделирования боевых действий ...	78
Овакимян А.С., Саркисян С.Г., Н.Г. Испирян Самоорганизующиеся сети в задачах классификации данных	87
Саркисян С.Г., Овакимян А.С. Оценка эффективности работы нейронной сети	94

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Авджян К.Э., Ахоян Л.А., Геворкян В.А., Матевосян Л.А. Исследование оптических и структурных характеристик тонких пленок теллурида кадмия, полученных методом лазерного импульсного осаждения	99
---	----

Багдасарян О.В., Дарьян А.В., Князян Т.М. Самовоздействие плоской электромагнитной волны в ионизирующей среде: качественный анализ методом фазовой плоскости	107
Геворкян Д.А., Нанасян А.С. Особенности построения систем дистанционного мониторинга и управления на базе технологий SMS...	114
Оганесян С.Г. Исследование вклада спонтанного излучения в выходную мощность ондуляторного генератора	118
Паплойн В.А., Меликян А.О. Зависимость частоты плазменных колебаний от межчастичных расстояний в взаимодействующих металлических наносферах	126
Погосян М.А., Темирязев А.Г. Использование атомно-силовой микроскопии для исследования ферромагнитных стекол.....	136

БИОЛОГИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Арутюнян М.К. Эколого-этологические особенности оседлых и мигрирующих видов подковоносовых (Rhinolophidae) летучих мышей Южного Кавказа.....	142
Гаспарян Г.Г. Биохимические показатели крови крыс с токсическим гепатитом при действии спиртового экстракта лавра благородного (Laurus Nobilis)	145
Грабский О.В. Гром: редактор параметров и манипуляция координатных файлов.переход из PYTHON на PYTHON3	151
Грабский О.В. Исследование взаимодействия метиленового синего с днк методом молекулярной динамики	158
Yesayan A., Novhannisyan H., Yerpiskoposyan L. mtMart – a novel database for complete human mitochondrial genomes	166
Папян Л. Обзор исследований поведения и активности мелких видов млекопитающих методом использования фотоловушки	171

МАТЕМАТИКА

ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОБРАЩЕНИЯ МУРА-ПЕНРОУЗА ДВУХДИАГОНАЛЬНЫХ МАТРИЦ СПЕЦИАЛЬНОГО ВИДА

С. С. Алексанян
alexosarm@gmail.com

Аннотация

В работе описывается метод получения в явном виде элементов обратной матрицы Мура-Пенроуза для двухдиагональных матриц специального вида.

Ключевые слова: двухдиагональная матрица, трехдиагональная матрица, обратная матрица Мура-Пенроуза, псевдообращение.

ՄՈՒՐ-ՊԵՆՐՈՈՒԶԻ ՀԱԿԱԳԱՐՉՍԱՆ ԲԱՆԱԶԵՎԵՐ ՀԱՏՈՒԿ ՏԵՍՔԻ ԵՐԿԱՆԿՅՈՒՆԱԳԾԱՅԻՆ ՄԱՏՐԻՑՆԵՐԻ ՀԱՍԱՐ

Ս. Ս. Ալեքսանյան

Անոտացիա

Աշխատանքում նկարագրվում է ակնհայտ տեսքով Մուր-Պենրոուզի հակադարձ մատրիցի տարրերի ստացման մեթոդը հատուկ տեսքի երկանկյունազծային մատրիցների համար:

Հիմնաբառեր՝ երկանկյունազծային մատրիցա, երեքանկյունազծային մատրիցա, Մուր-Պենրոուզի հակադարձ մատրիցա, պսևդոհակադարձում:

FORMULAS FOR MOORE-PENROSE INVERSION OF SPECIAL FORM BIDIAGONAL MATRICES

S. S. Aleksanyan

Summary

The Paper describes a method for obtaining explicit form of Moore-Penrose inverse matrix elements for bidiagonal matrices of special form.

Keywords: bidiagonal matrix, tridiagonal matrix, Moore-Penrose inverse matrix, pseudoinversion.

Многие вычислительные задачи сводятся к решению систем линейных алгебраических уравнений, которые не всегда являются совместными. Такие задачи возникают в математической статистике, линейном программировании и других областях (см., напр., [1,2]). Если уж не существует точного решения системы, то ищется некоторое компромиссное «решение», иначе говоря – *решение, почти удовлетворяющее рассматриваемой системе в определенном смысле*. Пример тому – широко применяемый на практике метод наименьших квадратов (см., напр., [3]). Использование этого метода приводит к понятию *обратной матрицы Мура-Пенроуза* [4,5] или, как еще говорят, *псевдообратной матрицы*. Напомним ее определение. Для любой матрицы $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ обратная матрица Мура-Пенроуза $A^+ \in \mathbb{R}^{n \times m}$ однозначно определяется следующими четырьмя условиями:

$$AA^+A = A, A^+AA^+ = A^+, (A^+A)^T = A^+A, (AA^+)^T = AA^+.$$

В случае, когда A – невырожденная квадратная матрица, матрица A^+ совпадает с обратной матрицей A^{-1} .

В настоящее время наиболее эффективная процедура обращения Мура-Пенроуза осуществляется следующим образом. Она включает в себя два основных этапа. На первом этапе исходная матрица с помощью отражений Хаусхолдера приводится к двухдиагональному виду. Тем самым задача сводится к псевдообращению двухдиагональной матрицы. На втором этапе строится итерационная процедура, известная как алгоритм Голуба-Райнша [5], которая с помощью матриц плоских вращений генерирует последовательность матриц, сходящихся к диагональной матрице. В итоге получают приближение к сингулярному разложению двухдиагональной матрицы, с помощью которого находят обратную матрицу Мура-Пенроуза для исходной матрицы.

Однако на упомянутом выше втором этапе процедуры псевдообращения можно применить другой подход, альтернативный алгоритму Голуба-Райнша. Этот вопрос был исследован в работе [6], где был построен прямой метод обращения Мура-Пенроуза двухдиагональных матриц. В предлагаемой работе это направление получило дальнейшее развитие, а именно, приводятся полученные *явные формулы* для элементов обратной матрицы Мура-Пенроуза двухдиагональных матриц.

Рассматривается двухдиагональная матрица

$$A = \begin{bmatrix} d_1 & b_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & d_2 & b_2 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & 0 & d_{n-1} & b_{n-1} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & d_n \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Если бы все диагональные элементы были отличны от нуля, то матрица была бы невырожденной, и псевдообратная матрица совпадала бы с обычной обратной матрицей. Здесь мы будем рассматривать случай, когда

$$d_1, d_2, \dots, d_{n-1} \neq 0, d_n = 0. \quad (2)$$

Как показывает несложный анализ, все остальные варианты равенства нулю диагональных элементов матрицы могут быть сведены в конечном итоге, к случаю (2). Предположим также, что

$$b_1, b_2, \dots, b_{n-1} \neq 0.$$

В противном случае, если какие-то из наддиагональных элементов матрицы равны нулю, задача псевдообращения сводится к аналогичной задаче для двухдиагональных матриц более низкого порядка.

В основе используемого в данной работе метода получения явных формул лежит известное равенство

$$A^+ = \lim_{\varepsilon \rightarrow +0} (A^T A + \varepsilon I)^{(-1)} A^T, \quad (3)$$

где I – единичная матрица, справедливое для любой матрицы $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ [1,4]. В случае двухдиагональной матрицы вида (1) имеем

$$A^T A + \varepsilon I = \begin{bmatrix} d_1^2 + \varepsilon & b_1 d_1 & \cdots & 0 \\ b_1 d_1 & b_1^2 + d_2^2 + \varepsilon & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & b_{n-2}^2 + d_{n-1}^2 + \varepsilon & b_{n-1} d_{n-1} \\ \vdots & \vdots & b_{n-1} d_{n-1} & b_{n-1}^2 + d_n^2 + \varepsilon \end{bmatrix} \quad (4)$$

Предлагаемый путь получения явных формул для элементов псевдообратной матрицы A^+ заключается в следующем. Как видно из (4), симметричная положительно определенная матрица $A^T A + \varepsilon I$ является трехдиагональной. Сначала вычисляются элементы обратной матрицы $(A^T A + \varepsilon I)^{-1}$. Для этой цели используется процедура, следующая из результатов, полученных в статье [7]. Пусть имеется невырожденная симметричная трёхдиагональная матрица

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} & & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \\ 0 & 0 & \dots & c_{n-1\ n-1} & c_{n-1\ n} \\ 0 & 0 & & c_{nn-1} & c_{nn} \end{bmatrix}.$$

Тогда элементы обратной матрицы $C^{-1} = [x_{ij}]_{n \times n}$ вычисляются следующим образом.

Процедура 3d/inv:

1. Вычисляются величины:

$$f_i = \frac{c_{ii}}{c_{i\ i-1}}, \quad i = 2, 3, \dots, n; \quad g_i = \frac{c_{i\ i+1}}{c_{i\ i-1}}, \quad i = 2, 3, \dots, n-1;$$

$$h_i = \frac{c_{ii}}{c_{i\ i+1}}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1.$$

2. Последовательно вычисляются величины:

$$\mu_n = 1, \quad \mu_{n-1} = -f_n, \quad \mu_i = -f_{i+1}\mu_{i+1} - g_{i+1}\mu_{i+2}, \quad i = n-2, n-3, \dots, 1;$$

$$v_1 = 1, \quad v_2 = -h_1, \quad v_i = -h_{i-1}v_{i-1} - \frac{1}{g_{i-1}}v_{i-2}, \quad i = 3, 4, \dots, n.$$

3. Вычисляется величина

$$t = (c_{11}\mu_1 + c_{12}\mu_2)^{-1}.$$

4. Для значений $j = 1, 2, \dots, n$ вычисляются элементы «нижней треугольной части» матрицы C^{-1} :

$$x_{ij} = v_j\mu_i t, \quad i = j, j+1, \dots, n.$$

5. Для значений $j = 2, 3, \dots, n$ вычисляются элементы «верхней треугольной части» матрицы C^{-1} .

$$x_{ij} = x_{ji}, \quad i = 1, 2, \dots, j-1.$$

Конец процедуры

После вычисления элементов матрицы $(A^T A + \varepsilon I)^{-1}$ вычисляются элементы матрицы $(A^T A + \varepsilon I)^{-1} A^T$ и выявляется характер их зависимости от параметра ε . Согласно равенству (3), последующим переходом к пределу при $\varepsilon \rightarrow +\infty$ получаем формулы для элементов обратной матрицы Мура-Пенроуза A^+ . Окончательный результат формулируется в виде следующей теоремы.

Теорема. Для любой двухдиагональной матрицы

$$A = \begin{bmatrix} d_1 & b_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_2 & b_2 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & 0 & d_{n-1} & b_{n-1} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

в которой $b_i, d_i \neq 0$, $i = 1, 2, \dots, n-1$ элементами матрицы $A^+ = [a_{ij}]_{n \times n}$ являются

$$a_{ij} = \frac{(-1)^{i+j} \left(\prod_{s=1}^{i-1} \frac{1}{r_s} \right) \sum_{k=1}^{n-j} \left(\left(\prod_{s=j+1}^{n-k} \frac{1}{r_s} \right) \left(\prod_{s=n-k+1}^{n-1} r_s \right) \right)}{b_j \sum_{k=1}^n \left(\left(\prod_{s=1}^{n-k} \frac{1}{r_s} \right) \left(\prod_{s=n-k+1}^{n-1} r_s \right) \right)},$$

$j = 1, 2, \dots, n-1$, $i = 1, 2, \dots, j$;

$$a_{ij} = \frac{(-1)^{i+j+1} \prod_{s=i}^{n-1} r_s \cdot \sum_{k=1}^j \left(\left(\prod_{s=1}^{k-1} \frac{1}{r_s} \right) \left(\prod_{s=k}^{j-1} r_s \right) \right)}{d_j \sum_{k=1}^n \left(\left(\prod_{s=1}^{n-k} \frac{1}{r_s} \right) \left(\prod_{s=n-k+1}^{n-1} r_s \right) \right)},$$

$j = 1, 2, \dots, n-1$, $i = j+1, j+2, \dots, n$;

$$a_{in} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где $r_s \equiv \frac{b_s}{d_s}$, $s = 1, 2, \dots, n$.

В заключение заметим, что полученный в теореме результат является базовым в том смысле, что на его основе можно получить формулы для любого расположения одного или более нулей на главной диагонали матрицы из (1).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Алберт А. Регрессия, псевдоинверсия и рекуррентное оценивание. М.: Наука, 1977.

- [2] *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979.
- [3] *Лоусон Ч., Хенсон Р.* Численное решение задач наименьших квадратов. М.: Наука, 1986.
- [4] *Ben-Israel A. and Greville T.N.E.* Generalized Inverses: Theory and Applications, 2nd ed.-Springer, New York, 2003.
- [5] *Golub G.H. and Loan Ch.F. van.* Matrix Computations, 3rd ed. The Johns Hopkins Univ. Press, 1996.
- [6] *Мартиросян В.А.* Алгоритм псевдообращения двухдиагональных матриц. Вестник Российско-Армянского (Славянского) университета (Серия: физико-математические и естественные науки, Ер., No. 1, 2008, 71–79.
- [7] *Lewis J.W.* Inversion of tridiagonal matrices. Numer. Math., 38,1982, 333–345.

A NEW CLASS OF CONVEX BODIES WITH INTEGRAL REPRESENTATION

Rafik Aramyan

January 27, 2015

affiliation: Russian-Armenian State University

e-mail: rafikaramyan@yahoo.com

Keywords: Zonoid, support function, cosine transform, convex body.

Abstract

In this paper we define a new larger class of convex bodies (in general non-centrally symmetric) with the representation for the support function which generalize the representation of zonoid. We discuss some questions on unique determination of convex bodies.

We denote by \mathbb{R}^d ($d \geq 2$) the Euclidean d dimensional space and \mathbb{S}^{d-1} the unit sphere in \mathbb{R}^d . The class of convex bodies (nonempty compact convex sets) K in \mathbb{R}^d we denote by \mathcal{K} and the class of centrally symmetric convex bodies (so called the *centred* bodies) denote by \mathcal{K}_o .

A zonotope is a finite sum (in the sense of Minkowski addition) of line segments in \mathbb{R}^d and so have a number of interesting symmetry properties. Zonoids are limits of zonotopes in the Hausdorff metric. Interest in zonoids arose from surprising connection between zonoids and analysis (positive definite functions, spherical Radon transforms), functional analysis (vector measures, subspace of L^1), stochastic and integral geometry (point processes, Crofton measures, stable laws).

The most useful analytic description of compact convex sets is by the support function. The support function of K is defined as

$$h(K, x) = \sup_{y \in K} \langle y, x \rangle, \quad x \in \mathbb{R}^d.$$

Here $\langle \cdot, \cdot \rangle$ denotes the Euclidean scalar product in \mathbb{R}^d . The support function of K is positively homogeneous and convex. Below, we consider the support function $h(K, \cdot)$ of a

^oThis work was supported by State Committee Science MES RA, in frame of the research project SCS 13-1A244

convex body as a function on the unit sphere \mathbb{S}^{d-1} (because of the positive homogeneity of $h(K, \cdot)$, the values on \mathbb{S}^{d-1} determine $h(K, \cdot)$ completely).

It is well known (Leichtweiz [10]) that a convex body $\mathbf{K} \in \mathcal{K}$ is determined uniquely by its support function.

The support function of a centred zonotope K is the sum of the support functions of a centred line segments and therefore takes the form

$$h(K, u) = \sum_{i=1}^n |\langle u, v_i \rangle| \rho(v_i), \quad u \in \mathbb{S}^{d-1}, \quad (0.1)$$

with different unit vectors v_i (unique up to reflections) and positive weights $\rho(v_i)$. For a zonoid K , the sum (0.1) transforms into the following integral involving an even measure on \mathbb{S}^{d-1} , i.e. one which assigns equal measure to antipodal sets [5, 6, 4, 7, 1]. *A centrally symmetric convex body K is a (centred) zonoid if and only if its support function is given by*

$$h(K, u) = \int_{\mathbb{S}^{d-1}} |\langle u, v \rangle| \mu(dv), \quad u \in \mathbb{S}^{d-1}, \quad (0.2)$$

where μ is a positive even Borel measure on \mathbb{S}^{d-1} .

The equation (0.2) or its variant

$$h(K, u) = \int_{\mathbb{S}^{d-1}} |\langle u, v \rangle| f(v) dv, \quad u \in \mathbb{S}^{d-1}, \quad (0.3)$$

for absolutely continuous μ with density f with respect to the Lebesgue measure on \mathbb{S}^{d-1} is called the zonoid equation. The right-hand side is called the cosine transform of f and denoted $(Tf)(u)$.

There are centrally symmetric convex bodies K whose support functions have the integral representation (0.2) with a signed even measure μ . Such bodies are called generalized zonoids [6]. Examples of generalized zonoids which are not zonoids are given by Schneider [7].

A result of Aleksandrov [2] states (which also has been rediscovered a number of times, e.g., by Matheron [3], Blaschke [5] (for $d = 3$ and smooth measures) that the measure μ in (0.2) is unique. It was proved that if μ is an even signed measure on \mathbb{S}^{d-1} with

$$\int_{\mathbb{S}^{d-1}} |\langle x, v \rangle| \mu(dv) = 0, \quad \text{for all } x \in \mathbf{R}^d \quad (0.4)$$

then $\mu \equiv 0$. From this it follows:

The cosine transform (Tf) is injective on $C^\infty(\mathbb{S}^{d-1})$.

If the even function h is sufficiently often differentiable, then (0.3) has a continuous solution f as noticed by Blaschke with a rigorous proof given by Schneider [8]. From this it follows:

The generalised zonoids are dense in the class of centrally symmetric convex bodies (see [8]).

The class of zonoid in \mathbb{R}^d we denote by \mathcal{Z} and the class of generalised zonoids we denote by \mathcal{GZ} . We have $\mathcal{Z} \subset \mathcal{GZ} \subset \mathcal{K}_o$.

In this paper we define a new larger class of convex bodies with the representation for their support functions which generalize the representation (0.2).

To find a representation for the support function of a non-centrally symmetric convex body $K \in \mathcal{K}$ we have to fix a point in the body. In this paper we will consider the support function of convex body K with respect to its Steiner point $s(K)$.

The Steiner point $s(K)$ of a convex body $K \in \mathcal{K}$, known for over a century, is defined by the following integral

$$s(K) = \frac{d}{\lambda_{d-1}(\mathbb{S}^{d-1})} \int_{\mathbb{S}^{d-1}} u h(K, u) \lambda_{d-1}(du).$$

Here λ_{d-1} is the Lebesgue measure on \mathbb{S}^{d-1} , h is the support function of K .

Definition 1. We call a convex body $K \in \mathbb{R}^d$ a pseudo zonoid if its support function has the integral representation

$$h(u) = \int_{\langle u, v \rangle \geq 0} \langle u, v \rangle m(dv) \quad \text{for all } u \in \mathbb{S}^{d-1}. \quad (0.5)$$

Here we consider the integral over the hemisphere involving a positive Borel measure m (not necessary even) on \mathbb{S}^{d-1} satisfying the condition

$$\int_{\mathbb{S}^{d-1}} u m(du) = 0. \quad (0.6)$$

Note that a zonoid K is a pseudo zonoid since any even Borel measure m on \mathbb{S}^{d-1} satisfies the condition (0.6) and

$$h(K, u) = \int_{\mathbb{S}^{d-1}} |\langle u, v \rangle| \mu(dv) = 2 \int_{\langle u, v \rangle \geq 0} \langle u, v \rangle \mu(dv), \quad u \in \mathbb{S}^{d-1}.$$

The equation (0.5) or its variant

$$Qf(u) = \int_{\langle u, v \rangle \geq 0} \langle u, v \rangle f(v) dv, \quad u \in \mathbb{S}^{d-1}, \quad (0.7)$$

for absolutely continuous μ with density f with respect to the Lebesgue measure on \mathbb{S}^{d-1} defines a transform on $C^\infty(\mathbb{S}^{d-1})$ and denoted by (Qf) .

1 The class of pseudo zonoids

To represent the support function of a non-centrally symmetric convex body $K \in \mathcal{K}$ we transform the integral (0.3) into the following integral over the hemisphere involving a non- even measure on \mathbb{S}^{d-1}

$$h(u) = \int_{\langle u, v \rangle \geq 0} \langle u, v \rangle m(dv) \text{ for all } u \in \mathbb{S}^{d-1}. \quad (1.1)$$

We have the following theorems.

Theorem 1 *Let m be a positive Borel measure on \mathbb{S}^{d-1} . Then the function*

$$h(x) = \int_{\langle x, v \rangle \geq 0} \langle x, v \rangle m(dv), \text{ for } x \in \mathbb{R}^d \quad (1.2)$$

is positively homogeneous and convex.

Proof 1 *It is easy to verify that for $v \in \mathbb{S}^{d-1}$ the function*

$$F(x, v) = \langle x, v \rangle I_{\langle x, v \rangle \geq 0} \text{ for } x \in \mathbb{R}^d$$

where I - the indicator function is positively homogeneous and convex, which implies Theorem 1.

The next theorem shows that the measure m in (1.2) can not be uniquely determined by h .

Theorem 2 *The transform (Qf) on $C^\infty(\mathbb{S}^{d-1})$ defined by (0.7) is non-injective on $C^\infty(\mathbb{S}^{d-1})$.*

Proof 2 *It follows from the following result was proved in [11]. If μ is a signed measure on \mathbb{S}^{d-1} with*

$$\int_{\langle x, v \rangle \geq 0} \langle x, v \rangle \mu(dv) = 0, \text{ for all } x \in \mathbb{R}^d \quad (1.3)$$

then either $\mu \equiv 0$ or μ is odd.

Note, that there is an odd measure on \mathbb{S}^{d-1} satisfying (1.3). For example, for $d = 2$ the signed measure $\mu(d\varphi) = \sin 3\varphi d\varphi$ satisfies (1.3).

The following result is well known (see [9]). *Let h be a positively homogeneous and convex function defined on \mathbb{R}^d . Then there exists a unique nonempty, convex body $K \in \mathcal{K}$ with support function h .*

Hence to each positive Borel measure m (not necessary even) on \mathbb{S}^{d-1} via the equation (1.1) corresponds convex body K . On the other hand the definition of the support

function depends on the origin. To create correspondence between measures defined on the sphere and the class of convex bodies we consider the support function of convex body K with respect to its Steiner point $s(K)$.

Let the support function of K with respect to its Steiner point $s(K)$ satisfies to (0.5) for a positive Borel measure m (not necessary even) on \mathbb{S}^{d-1} . Below we always assume that $s(K)$ is the origin of \mathbb{R}^d . Since the Steiner point $s(K)$ is the origin we have

$$s(K) = \int_{\mathbb{S}^{d-1}} u h(K, u) \lambda_{d-1}(du) = 0. \quad (1.4)$$

Substituting (1.2) into (1.4) and using Fubini's theorem, we get condition (0.6)

$$s(K) = \int_{\mathbb{S}^{d-1}} u \int_{\langle u, v \rangle \geq 0} \langle u, v \rangle m(dv) \lambda_{d-1}(du) = \int_{\mathbb{S}^{d-1}} m(dv) \int_{\langle u, v \rangle \geq 0} u \langle u, v \rangle \lambda_{d-1}(du) = \frac{2\pi}{3} \int_{\mathbb{S}^{d-1}} v m(dv). \quad (1.5)$$

Hence it follows from (1.4) and (1.5) that if the support function of K with respect to its Steiner point $s(K)$ satisfies to (0.5) for a positive Borel measure m (not necessary even) on \mathbb{S}^{d-1} then

$$\int_{\mathbb{S}^{d-1}} v m(dv) = 0. \quad (1.6)$$

Taking into account (1.1) and (1.6) we define the class of convex bodies (so-called pseudo zonoid) see Definition 1.

Also it follows from a standard compactness argument for measures on the sphere that

Theorem 3 *The class of pseudo zonoids in \mathbb{R}^d is closed.*

References

- [1] *R. V. Ambartzumian*, Combinatorial integral geometry, metric and zonoids // Acta Appl. Math. 9, pp. 3–27, 1987.
- [2] *A. D. Alexandrov*, On the theory of mixed volumes. New inequalities between mixed volumes and their applications [in Russian] // Mat. Sb. 44, pp. 1205 – 1238, 1937.
- [3] *G. Matheron*, *Random Sets and Integral Geometry*. - Wiley, New York, 1975.
- [4] *E. D. Bolker*, A class of convex bodies // Trans. Amer. Math. Soc. 145, pp. 323-346, 1969.
- [5] *W. Blaschke*, *Kreis und Kugel*. - (Veit, Leipzig) 2nd Ed. De Gruyter, Berlin (1956).

- [6] *W. Wiel*, Kontinuierliche Linearkombination von Strecken // Math. Z. 148, p. 71-84, 1976.
- [7] *R. Schneider*, Über eine Integralgleichung in der Theorie der konvexen Körper // Math. Nachr. 44, pp. 55-75, 1970.
- [8] *R. Schneider*, Zu einem Problem von Shepard über Projektionen konvexen Körper // Math. Z. 101, pp. 71-82, 1967.
- [9] *W. Wiel, R. Schneider*, Zonoids and related Topics, in Convexity and its Applications // Ed. P. Gruber and J. Wills, Birkhauser, Basel, 1983.
- [10] *K. Leichtweiz*, *Konvexe Mengen*, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1980.
- [11] *R. Aramyan*, A representation for convex bodies // Armenian Journal of Mathematics. 5(1), pp. 69-74, 2013.

О НЕКОТОРЫХ ДОСТАТОЧНЫХ УСЛОВИЯХ СУЩЕСТВОВАНИЯ УГЛОВЫХ ГРАНИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ У ГАРМОНИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

С.Л. Берберян
samvel357@mail.ru

Аннотация

В работе рассматривается вопрос существования угловых граничных значений у гармонических функций, определенных в единичном круге. Аналогичные исследования ранее проводились для мероморфных и голоморфных функций.

Ключевые слова: гармонические функции, нормальные хорды и функции, множества первых и вторых категорий, метрически плотное множество.

ՀԱՐՄՈՆԻԿ ՖՈՒՆԿՑԻԱՆԵՐԻ ՄՈՏ ԱՆԿՅՈՒՆԱՅԻՆ ԵԶՐԱՅԻՆ ԱՐԺԵՔՆԵՐԻ ԳՈՅՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇ ԲԱՎԱՐԱՐ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ

Ս.Լ. Բերբերյան

Ամփոփում

Աշխատանքում ուսումնասիրվում է միավոր շրջանում որոշված հարմոնիկ ֆունկցիաների անկյունային եզրային արժեքների գոյության հարցը: Նախկինում նման հետազոտություններ կատարվել են մերոմորֆ և հոլոմորֆ ֆունկցիաների համար:

Հիմնաբառեր՝ հարմոնիկ ֆունկցիաներ, նորմալ լարեր և ֆունկցիաներ, առաջին և երկրորդ կատեգորիաների բազմություններ, մետրիկապես խիտ բազմություն:

ON SOME SUFFICIENT CONDITIONS FOR THE EXISTENCE OF ANGULAR BOUNDARY VALUES OF HARMONIC FUNCTIONS

S. Berberyan

Summary

This paper considers the issue of angular boundary values existence of harmonic functions defined in the unit circle. Similar studies were carried out previously for meromorphic and holomorphic functions.

Keywords: harmonic functions, normal chords and functions, first and second category sets, metrically dense set.

В дальнейшем будем придерживаться общепринятых обозначений (см. [1]). Обозначим через D , Γ и $h(\xi, \varphi)$, соответственно, единичный круг $|z| < 1$, единичную окружность $|z| = 1$ и хорду единичного круга D , оканчивающуюся в точке $\xi = e^{i\theta} \in \Gamma$ и образующую с радиусом в этой точке угол $\varphi; -\frac{\pi}{2} < \varphi < \frac{\pi}{2}$. Пусть, $\Delta(\xi, \varphi_1, \varphi_2)$ обозначает подобласть круга D , ограниченную хордами $h(\xi, \varphi_1)$ и $h(\xi, \varphi_2)$. Область $\Delta(\xi, \varphi_1, \varphi_2)$ называют обычно углом Штольца с вершиной в точке $\xi = e^{i\theta} \in \Gamma$ и если нас не интересует размер угла Штольца, мы будем обозначать его кратко $\Delta(\xi)$. Интерпретируя круг D , как модель плоскости в геометрии Лобачевского, обозначим через $\sigma(z_1, z_2)$ неевклидовое расстояние между точками z_1, z_2 из круга D :

$$\sigma(z_1, z_2) = \frac{1}{2} \ln \frac{1+u}{1-u}, \text{ где } u = \left| \frac{z_1 - z_2}{1 - z_1 \bar{z}_2} \right|.$$

Рассмотрим действительнзначную функцию $f(z)$. Для произвольного подмножества S круга D , для которого точка $\xi \in \Gamma$ является предельной точкой, обозначим через $C(f, \xi, S)$ предельное множество функции $f(z)$ в точке ξ относительно множества S , т.е. $C(f, \xi, S) = \overline{\bigcap f(S \cap U(\xi))}$, где пересечение берётся по всем окрестностям $U(\xi)$ точки ξ , а черта означает замыкание множества относительно двухточечной компактификации \bar{R} множества $R = (-\infty, +\infty)$ в виде отрезка посредством добавления к точкам множества R символов $-\infty$ и $+\infty$. Точку $\xi \in \Gamma$ отнесем к множеству $F(f)$, если $C(f, \xi, \Delta(\xi))$ состоит из единственного значения α . В этом случае говорят, что функция $f(z)$ имеет в точке $\xi \in \Gamma$ угловой предел α . Точку $\xi \in \Gamma$ отнесем к множеству $I(f)$, если $C(f, \xi, \Delta(\xi, \varphi_1, \varphi_2)) = C(f, \xi, \Delta(\xi, \varphi_1', \varphi_2')) = \bar{R}$ для любых двух

углов $\Delta(\xi, \varphi_1, \varphi_2)$, $\Delta(\xi, \varphi_1', \varphi_2')$, где $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_1', \varphi_2' \in (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$.

Множество $I(f)$ называется множеством точек Плеснера для функции $f(z)$. Множество E на Γ называется множеством первой категории (см. [2]), если оно является объединением счетного семейства нигде не плотных множеств. Множество E , не являющееся множеством первой категории, называется множеством второй категории. Последовательность точек $\{z_n\}, z_n \in D, n=1, 2, \dots, \lim_{n \rightarrow \infty} |z_n| = 1$, следуя В.И. Гаврилову, применительно к гармоническим функциям (см. [2]), назовем P' -последовательностью, если для любой ее бесконечной подпоследовательности $\{z_{n_k}\}$ имеет место следующее утверждение:

каково бы ни было число $\varepsilon > 0$ в объединении $\bigcup_{k=1}^{\infty} D(z_{n_k}, \varepsilon)$ неевклидовых кругов $D(z_{n_k}, \varepsilon)$ с неевклидовыми центрами z_{n_k} и неевклидовыми радиусами $\varepsilon > 0$ гармоническая функция $u(z)$ принимает бесконечно часто каждое конечное действительное значение. Назовем хорду $h(\xi, \varphi)$ P' – хордой гармонической функции $u(z)$ в точке ξ , если $h(\xi, \varphi)$ содержит некоторую P' – последовательность функции $u(z)$. Хорду $h(\xi, \varphi)$, не являющуюся P' – хордой, назовем нормальной. ξ . Множество $N \subset \Gamma$ называют метрически плотным на некоторой дуге $\gamma \subset \Gamma$, если линейная мера $mes(\gamma' \cap N)$ положительна для каждой дуги $\gamma' \subset \gamma$. Понятие нормальной функции, рассмотренное для мероморфных функций и состоящее в свойстве порождать нормальное семейство на группе T всех конформных автоморфизмов области определения, было затем перенесено на гармонические и субгармонические функции. В случае единичного круга D группа T состоит из элементов $T = \{S(z); S(z) = e^{i\alpha}(z+a) \cdot (1+\bar{a}z)^{-1}, a - \text{произвольная точка в } D, \alpha - \text{произвольное действительное число}\}$. Придерживаясь обозначений из работы (см. [1]), скажем, что действительная функция $f(z)$ нормальна, если на группе T всех конформных автоморфизмов единичного круга D , порождаемое ею семейство функций $\Phi: \{f(S(z)); S(z) \in T\}$ нормально в D в смысле Монтеля, т.е. из любой последовательности $\{f(S_n(z))\}$ семейства Φ , где $S_n(z) \in T$, можно извлечь подпоследовательность $\{f(S_{n_k}(z))\}$, равномерно

сходящуюся на любом компакте K в D или равномерно расходящуюся к $-\infty$ или к $+\infty$ на K .

Доказательства основных результатов опираются на одно утверждение, полученное в работе [3].

Теорема А. Пусть для гармонической в D функции $u(z)$ в точке $\xi \in \Gamma$ можно указать такую хорду $h(\xi, \varphi)$, $-\frac{\pi}{2} < \varphi < \frac{\pi}{2}$, которая является нормальной для функции $u(z)$ и для которой предельное множество $C(u, \xi, h(\xi, \varphi_\xi)) \neq \bar{R}$ не совпадает с \bar{R} , Тогда точка ξ не является точкой Плеснера для $u(z)$.

В настоящей работе получены следующие результаты.

Теорема 1. Пусть $u(z)$ – гармоническая функция, определенная в D , E – некоторое множество на дуге $\gamma \subset E$, $\text{mes } E > 0$. Допустим, в каждой точке $\xi \in E$ можно указать такую хорду $h(\xi, \varphi_\xi)$ $-\frac{\pi}{2} < \varphi_\xi < \frac{\pi}{2}$, что:

- 1) $C(u, \xi, h(\xi, \varphi_\xi)) \neq \bar{R}$;
- 2) хорда $h(\xi, \varphi_\xi)$ – нормальная для $u(z)$ и
- 3) $\beta \in C(f, \xi, h(\xi, \alpha))$, по крайней мере, для одной хорды $h(\xi, \alpha)$ в каждой точке $\xi \in E$.

Тогда существует такое множество $F, \text{mes } F > 0$, содержащееся в E , в почти каждой точке которого функция $u(z)$ имеет угловые граничные значения, равные β .

Анализируя доказательство теоремы 1, можно заметить, что справедлива следующая теорема.

Теорема 2. Пусть $u(z)$ – нормальная гармоническая функция, определенная в D и E – некоторое множество на дуге $\gamma \subset \Gamma$, $\text{mes } E > 0$. Допустим, в каждой точке $\xi \in E$ можно указать такую хорду $h(\xi, \varphi_\xi)$ $-\frac{\pi}{2} < \varphi_\xi < \frac{\pi}{2}$, что:

- 1) предельное множество $C(f, \xi, h(\xi, \varphi_\xi))$ ограничено сверху;
- 2) $\beta \in C(f, \xi, h(\xi, \alpha))$, по крайней мере, для одной хорды $h(\xi, \alpha)$ в каждой точке $\xi \in E$.

Тогда существует такое множество $F, \text{mes} F > 0$, содержащееся в E , в почти каждой точке которого функция $u(z)$ имеет угловые граничные значения, равные β .

Рассмотрим граничное поведение гармонических и нормальных гармонических функций в случае, когда множество E охарактеризовано в терминах категорий.

Теорема 3. Пусть $u(z)$ – гармоническая функция, определенная в D , E – некоторое множество второй категории на дуге $\gamma \subset \Gamma$. Допустим, в каждой точке $\xi \in E$ можно указать такую хорду $h(\xi, \varphi_\xi)$,

$-\frac{\pi}{2} < \varphi_\xi < \frac{\pi}{2}$, что:

- 1) $C(u, \xi, h(\xi, \varphi_\xi)) \neq \bar{R}$;
- 2) хорда $h(\xi, \varphi_\xi)$ – нормальная для функции $u(z)$;
- 3) существует такое метрически плотное на γ множество N , что $\beta \in C(f, \xi, h(\xi, \alpha))$, по крайней мере, для одной хорды $h(\xi, \alpha)$ в каждой точке $\xi \in N$.

Тогда функция $u(z)$ имеет угловые граничные пределы почти всюду на дуге $\gamma' \subset \gamma$, равные β .

Доказательство. Из условий 1) и 2) теоремы, в силу утверждения теоремы А, следует, что каждая точка $\xi \in E$ не является точкой Плеснера. Согласно теореме Мейера, справедливой для произвольных гармонических функций (см. [5]), отсюда следует, что все точки множества E , за исключением, быть может, некоторого множества $E_1 \subset E$ первой категории, принадлежат множеству $M(u)$. Согласно определению точек Мейера, $C(u, \xi, h(\xi, \varphi_\xi)) = C(u, \xi, D) \neq \bar{R}$ для любой хорды $h(\xi, \varphi_\xi)$. В силу замкнутости и связности предельного множества $C(u, \xi, D)$ для гармонической функции $u(z)$, отсюда следует, что существует некоторая окрестность точки ξ , в которой функция $u(z)$ ограничена сверху или снизу. Принимая во внимание условие 1), получим, что функция $u(z)$ ограничена сверху (снизу). Обозначим через γ' пересечение дуги γ с границей указанной окрестности. Согласно локальной форме теоремы Фату, для гармонических функций $u(z)$ почти всюду на γ' имеет угловые граничные значения. В силу условия 3), почти каждая точка дуги γ' будет точкой множества N и

угловые граничные пределы функции $u(z)$ равны β . Отсюда следует утверждение теоремы 3.

Анализируя доказательство теоремы 3, можно заметить, что справедливо следующее утверждение.

Теорема 4. Пусть $u(z)$ – нормальная гармоническая функция, определенная в D , E – некоторое множество второй категории на дуге $\gamma \subset \Gamma$. Допустим, в каждой точке $\xi \in E$ можно указать такую

хорду $h(\xi, \varphi_\xi)$, $-\frac{\pi}{2} < \varphi_\xi < \frac{\pi}{2}$, что:

- 1) предельное множество $C(f, \xi, h(\xi, \varphi_\xi))$ ограничено сверху;
- 2) существует такое метрически плотное на γ множество N , что $\beta \in C(f, \xi, h(\xi, \alpha))$, по крайней мере, для одной хорды $h(\xi, \alpha)$ в каждой точке $\xi \in N$.

Тогда функция $u(z)$ имеет угловые граничные пределы почти всюду на дуге $\gamma' \subset \gamma$, равные β .

Замечание. Отметим: в теоремах 1 и 3 можно заменить условие $C(u, \xi, h(\xi, \alpha_\xi)) \neq \bar{R}$ на условие, что существует некоторая последовательность $\{Z_n\} \in h(\xi, \alpha_\xi)$, $\lim_{n \rightarrow \infty} Z_n = \xi$, для которой $\lim_{n \rightarrow \infty} \sigma(z_n, z_{n+1}) = 0$ и $\lim_{n \rightarrow \infty} Z_n = \xi$. Это при наличии условия 2) доказано в работе [4].

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] *Гаврилов В.И.* Нормальные функции и почти периодические функции. ДАН СССР, 1978, т. 240, №4. СС. 768–770.
- [2.] *Коллингвуд Э. и Ловатер А.* Теория предельных множеств. 1971, М., Изд-во «Мир». С. 306.
- [3.] *Берберян С.Л.* О распределении значений гармонических функций в единичном круге. Изв. вузов. Математика, 2011, № 6. СС. 12–19.
- [4.] *Берберян С.Л.* О некоторых применениях P' – последовательностей при исследовании граничных свойств произвольных гармонических функций. Изв. вузов. Математика, 2011, № 9. СС. 3–9.
- [5.] *Yamashita Shinji* On Fatou-and Plessner type theorems. Proc. Japan Acad., 1970, vol. 46, № 6. PP. 494–495.

ИНТЕРПОЛЯЦИЯ НЕТЕРОВОСТИ И ИНВАРИАНТНОСТЬ ИНДЕКСА

А.А. Дарбинян, А.Г. Туманян

armankri@yahoo.com, ani.tumanyan92@gmail.com

Аннотация

В работе исследуются вопросы нетеровости и инвариантности индекса линейного ограниченного оператора, рассматриваемого на паре вложенных банаховых пространств. Получено необходимое и достаточное условие для инвариантности индекса, а также установлено достаточное условие для интерполяции нетеровости.

Ключевые слова: интерполяция нетеровости, индекс оператора, n -нормальный оператор, d -нормальный оператор.

ՆՅՈՏԵՐՅԱՆՈՒԹՅԱՆ ԻՆՏԵՐՊՈԼՅԱՑԻԱ ԵՎ ԻՆՎԱՐԻԱՆՏՆԵՒՆ ԻՆԴԱՐԻԱՆՏՈՒԹՅՈՒՆ

Ա.Ա. Դարբինյան, Ա.Գ. Թումանյան

Ամփոփում

Աշխատանքում հետազոտվում են նյոտերյանության ինտերպոլյացիայի և ինդեքսի ինվարիանտության հարցեր մեկը մյուսի մեջ ներդրված բանախայան տարածությունների զույգի վրա որոշված գծային սահմանափակ օպերատորների համար: Հետազոտության արդյունքում ստացված են անհրաժեշտ և բավարար պայման ինդեքսի ինվարիանտության համար և բավարար պայման նյոտերյանության ինտերպոլյացիայի համար:

Հիմնաբառեր` նյոտերյանության ինտերպոլյացիա, ինդեքս օպերատոր, n -նորմալ օպերատոր, d -նորմալ օպերատոր:

INTERPOLATION OF NEOTHERICITY AND INDEX INVARIANCE

A. Darbinyan, A. Tumanyan

Summary

In this research we study the issues of Noethericity and index invariance for a linear bounded operator considered on a pair of nested Banach spaces. As a result,

this research reveals the necessary and sufficient condition for the invariance of the index, as well as a sufficient condition for the interpolation of Noethericity.

Keywords: interpolation of noethericity, index operator, n-normal operator, d-normal operator.

Нетеровость операторов, значение и свойства индекса имеют важное значение для таких вопросов как: существование и единственность решения, определение условий разрешимости операторного уравнения, спектральные свойства операторов [1]. В работе при изучении инвариантности индекса на паре непрерывно плотно вложенных банаховых пространств получено необходимое и достаточное условие равенства индекса в этих пространствах, а также достаточное условие для интерполяции нетеровости. Приведен пример, демонстрирующий существенность этих условий. Эти условия, полученные для общих линейных операторов, применяются в дальнейшем при исследовании нетеровости и инвариантности индекса для эллиптических, полуэллиптических операторов. Интерес к этим операторам связан с их многочисленными применениями в решении задач физики, химии, экономики и других областей.

Для эллиптических операторов доказана нетеровость в гладких компактных многообразиях с краем и без края [2], получена формула для индекса в топологических терминах [3]. В работе [2], как следствие, получена инвариантность индекса на шкале пространств Соболева, определенных на компактном многообразии.

Для полуэллиптических операторов ранее были получены следующие основные результаты. Описан класс нетеровых операторов с постоянными коэффициентами в \mathbb{R}^n [4–5], получена нетеровость для одного класса полуэллиптических операторов с переменными коэффициентами в весовых пространствах Соболева [6].

Пусть $H_2 \subset H_1$, $H_2' \subset H_1'$ В-пространства и вложения непрерывно плотные, а $A: H_1 \rightarrow H_1'$ линейный ограниченный оператор с $\text{Dom}(A) = H_1$, $A^*: (H_1')^* \rightarrow (H_1)^*$ сопряженный оператор, где $l = 1, 2$.

Обозначим:

$$\text{Ker}_l(A) = \{u: u \in H_l, Au = 0\}, \text{Ker}_l(A^*) = \{u: u \in (H_l')^*, A^*u = 0\}$$

$$\text{Im}_l(A) = \{f: f \in H_l', \exists u \in H_l, Au = f\}, \alpha_l = \dim \text{Ker}_l(A), \beta_l = \dim \text{Ker}_l(A^*), l = 1, 2.$$

Заметим, что $\text{Ker}_2(A) \subset \text{Ker}_1(A), \text{Ker}_1(A^*) \subset \text{Ker}_2(A^*)$,

$$\text{следовательно, } \alpha_1 \geq \alpha_2, \beta_2 \geq \beta_1. \quad (1)$$

Определение 1. Ограниченный линейный оператор A , действующий из банахова пространства X в банахово пространство Y , называется n -нормальным, если выполняются следующие условия:

- 1) ядро оператора A является конечномерным ($\dim \text{Ker}A < \infty$);
- 2) область значений оператора A замкнуто ($\text{Im}A = \overline{\text{Im}A}$).

Определение 2. Ограниченный линейный оператор A , действующий из банахова пространства X в банахово пространство Y , называется d -нормальным, если выполняются следующие условия:

- 1) ядро сопряженного оператора A^* конечномерно ($\dim \text{Ker}A^* < \infty$);
- 2) область значений оператора A замкнуто ($\text{Im}A = \overline{\text{Im}A}$).

Определение 3. Ограниченный линейный оператор A , действующий из банахова пространства X в банахово пространство Y , называется нетеровым, если выполняются следующие условия:

- 1) ядро оператора A является конечномерным ($\dim \text{Ker}A < \infty$);
- 2) коядро оператора A конечномерно ($\dim \text{coker}A = \text{codim Im}A = \dim Y/\text{Im}A < \infty$);
- 3) область значений оператора A замкнуто ($\text{Im}A = \overline{\text{Im}A}$).

Индексом нетероваго оператора A назовем разность между размерностью ядра и коядра:

$$\text{ind}(A) = \dim \text{Ker}A - \text{codim Im}A.$$

Обозначим

$$\text{ind}_i(A) = \dim \text{Ker}_i(A) - \text{codim Im}_i(A) = \alpha_i - \beta_i, i = 1, 2.$$

Из (1) очевидно, что $\text{ind}_1(A) \geq \text{ind}_2(A)$ и

$$\text{ind}_1(A) = \text{ind}_2(A) \Leftrightarrow \alpha_1 = \alpha_2 \text{ и } \beta_1 = \beta_2.$$

Определение 4. Скажем, что оператор $A: N_1 \rightarrow N_2^i, i = 1, 2$ обладает свойством регулярности решений, если для произвольных $u \in N_1$ и $f \in N_2^i$, для которых выполняется $Au = f$, следует, что $u \in N_2$.

В работе используются следующие леммы:

Лемма 1. Пусть A ограниченный линейный оператор, действующий из банахова пространства X в банахово пространство Y . Если существует замкнутое подпространство $Y_1 \subset Y$ такое, что

$$Y_1 \cap \text{Im}A = \{0\} \text{ и } Y_1 \oplus \text{Im}A = Y, \text{ то } \text{Im}A = \overline{\text{Im}A}.$$

Лемма 2 (необходимость и достаточность регулярности). Пусть $A: H_1 \rightarrow H_1'$ d – нормальный. Тогда оператор $A: H_2 \rightarrow H_2'$ является d -нормальным с $\text{codim Im}_2(A) = \text{codim Im}_1(A)$ в том и только том случае, если он обладает свойством регулярности решений.

Доказана следующая теорема о необходимом и достаточном условии инвариантности индекса:

Теорема 1. Пусть, $A: H_i \rightarrow H_i'$ – нетеровый оператор, $i = 1, 2$. Для того чтобы $\text{ind}_1 A = \text{ind}_2 A$ необходимо и достаточно, чтобы существовал линейный ограниченный оператор $R: H_i' \rightarrow H_i$ такой, что $(RA - I)$ конечномерный оператор в $H_i, i = 1, 2$.

Пусть $H_2 \subset H_3 \subset H_1, H_2' \subset H_3' \subset H_1'$ – непрерывно плотные вложения банаховых пространств, $H_3 = \mathcal{F}(\{H_2, H_1\}), H_3' = \mathcal{F}(\{H_2', H_1'\})$, где \mathcal{F} интерполяционный функтор (см. [7]).

Имеет место следующая теорема об интерполяции нетеровых операторов:

Теорема 2. Пусть, $A: H_i \rightarrow H_i'$ – нетеровый оператор для $i = 1, 2$ с $\text{ind}_1 A = \text{ind}_2 A$. Тогда оператор $A: H_3 \rightarrow H_3'$ также будет нетеровым и $\text{ind}_1 A = \text{ind}_2 A = \text{ind}_3 A$.

Приведем пример, демонстрирующий, что равенство $\text{ind}_1 A = \text{ind}_2 A$ из условия теоремы 2, является существенным:

Обозначим: $l_2^\alpha = \left\{ x = (x_1, \dots, x_n, \dots) : \left(\sum_{n=1}^{\infty} |x_n a_n^\alpha|^2 \right)^{\frac{1}{2}} < \infty \right\}$, где $0 \leq \alpha \leq 1, \bar{a} = \{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ – положительная неограниченная монотонная последовательность, такая, что $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{a_{n+1}} = 0$.

Ясно, что $l_2^{\alpha_2} \subset l_2^{\alpha_1}$ при $0 \leq \alpha_1 < \alpha_2 \leq 1$, причем вложение непрерывно плотное.

Рассмотрим оператор, действующий из l_2^α в l_2^α для $0 \leq \alpha \leq 1$ по следующему правилу:

$$Ae_i^{(\alpha)} = \left(\frac{a_{i-k}}{a_i} \right)^\alpha e_{i-k}^{(\alpha)} + \left(\frac{a_i}{a_{i+r}} \right)^{1-\alpha} e_{i+r}^{(\alpha)}, \quad i = 1, 2, \dots$$

где $e_i^{(\alpha)} = e_i a_i^{-\alpha}, \{e_i\}$ – ортонормированный базис в l_2 , следовательно, $\{e_i^{(\alpha)}\}$ – ортонормированный базис в $l_2^\alpha, e_{i-k}^{(\alpha)} = 0$ при $i - k \leq 0$.

Оператор $A: l_2^\alpha \rightarrow l_2^\alpha$ является нетеровым при $\alpha = 0$ и $\alpha = 1$ с индексами $\text{ind}_{l_2^\alpha}(A) = k$ и $\text{ind}_{l_2^\alpha}(A) = -r$, соответственно. При

$0 < \alpha < 1$ оператор является компактным оператором в силу того, что $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{a_i - k}{a_i} \right)^\alpha = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{a_i}{a_{i+1}} \right)^\alpha = 0$, следовательно, не может иметь замкнутый образ (см. [8]), то есть не является нетеровым.

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] *Кутателадзе С.С.* Основы функционального анализа. Новосибирск, Изд.-во Института Математики, 2006.
- [2.] *Агранович М.С.* Эллиптические сингулярные интегродифференциальные операторы. //Успехи Мат. Наук, 1965, т. 20, Вып. 5(125). СС. 3–120.
- [3.] *Atiyah M.F., Singer I.M.* The index of elliptic operators on compact manifolds, Bull. Amer. Math. Soc. 1963, V. 69. PP. 422–433.
- [4.] *Дарбинян А. А, Туманян А.Г.* Необходимое и достаточное условие нетеровости оператора с постоянными коэффициентами. Вестник РАУ 2014 #2, Ер.: Изд-во РАУ. СС. 4–14, 2014.
- [5.] *Дарбинян А.А., Туманян А.Г.* Построение регуляризатора для полуэллиптического оператора. Сборник научных статей. Седьмая Годичная Научная конференция (3–7 декабря 2012), Ер.: Изд-во РАУ. СС. 19–23, 2013.
- [6.] *Карпетян Г.А., Дарбинян А.А.* Об индексе полуэллиптического оператора в \mathbb{R}^n , Изв. НАН. Арм., Мат., Т. 42, № 5. СС. 33–50, 2007.
- [7.] *Трибель Х.* Теория интерполяции, функциональные пространства, дифференциальные операторы, Мир, М.: 1980.
- [8.] *Крейн С. Г.* Линейные уравнения в банаховых пространствах, Наука, М.: 1971.

ИНТЕГРАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЧЕРЕЗ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ОПЕРАТОР

Г.А. Карапетян

Garnik_Karapetyan@yahoo.com

Аннотация

В данной работе получено интегральное представление через дифференциальный оператор, характеристический многочлен которого стремится к бесконечности. Применяя полученное представление, изучается поведение решения соответствующего дифференциального уравнения в бесконечности.

Ключевые слова: интегральное представление, дифференциальный оператор, характеристический многочлен, вполне правильный многогранник.

ԻՆՏԵԳՐԱԼԱՅԻՆ ՆԵՐԿԱՅԱՑՈՒՄ ԳԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼ ՕՊԵՐԱՏՈՐԻ ՄԻՋՈՑՈՎ

Գ.Ա. Կարապետյան

Ամփոփում

Աշխատանքում ստացված է ինտեգրալային ներկայացում այնպիսի դիֆերենցիալ օպերատորի միջոցով, որի բնութագրիչ բազմանդամը ձգտում է անվերջության: Կիրառելով ստացված ներկայացումը՝ ուսումնասիրվում է համապատասխան դիֆերենցիալ հավասարման լուծման վարքն անվերջությունում:

Հիմնաբառեր՝ ինտեգրալային ներկայացում, դիֆերենցիալ օպերատոր, բնութագրիչ բազմանդամ, լիովին կանոնավոր բազմանիստ:

INTEGRAL REPRESENTATION THROUGH A DIFFERENTIAL OPERATOR

G. Karapetyan

Summary

In this paper an integral representation is obtained in terms of differential operator the characteristic polynomial of which tends to infinity. Applying the resulting representation, the behavior of the corresponding solution to the differential equation at infinity is studied.

Keywords: integral representation, differential operator, characteristic polynomial, completely regular polyhedron.

Введение

Известны различные представления функций через производные (см. [1]). В данной работе представлены функции через дифференциальный оператор, характеристический многочлен которого стремится к бесконечности. Аналогичное представление для эллиптического оператора получено в работе [2], а для регулярного дифференциального оператора – в работе [3].

Пусть,

$$P(D) = \sum \gamma_\alpha D^\alpha \quad (1)$$

дифференциальный оператор для набора мультииндексов α , с постоянными коэффициентами γ_α . Сопоставим оператору $P(D)$ многочлен от n переменных:

$$P(\xi) = \sum \gamma_\alpha \xi^\alpha, \quad (2)$$

где $\xi^\alpha = \xi_1^{\alpha_1} \dots \xi_n^{\alpha_n}$ предположим, что многочлен $P(\xi)$ стремится к бесконечности, когда $|\xi| \rightarrow +\infty$. Для таких многочленов доказана (см. [4]), что существует вполне правильный многогранник \aleph с рациональными вершинами, что

$$P(\xi) \geq \sum_{\delta \in \aleph} |\xi^\delta| \quad (3)$$

где $\xi^\delta = \xi_1^{\delta_1} \dots \xi_n^{\delta_n}$, а δ вершина многогранника \aleph . Обозначим через k наименьшее общее кратное знаменателей δ^i .

Для произвольного $\nu > 0$ положим

$$G_0(\xi; \nu) = e^{-(\nu P(\xi))^{2k}}, \quad G_1(\xi; \nu) = 2ke^{-(\nu P(\xi))^{2k}} (\nu P(\xi))^{2k-1}.$$

Из условия (3) следует, что G_0, G_1 – функции, принадлежащие классу S , где S – класс быстро убывающих бесконечно дифференцируемых функций Шварца. Следовательно, их преобразования Фурье \hat{G}_0, \hat{G}_1 также принадлежат классу S . Теперь рассмотрим усреднение функции u через ядро $\hat{G}_0(t; \nu)$, т.е.

$$u_\nu(x) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}}} \int_{R^n} u(t) \hat{G}_0(t-x; \nu) dt \quad (4)$$

Имеет место следующая

ЛЕММА 1. Если $u \in L_p(R^n)$, то $u_\nu \in L_p(R^n)$ и $\|u_\nu\|_{L_p} \rightarrow 0$ при $\nu \rightarrow \infty$.

Для произвольного $N > 0$ обозначим через

$$S_N = \left\{ u; \text{ для которых } \exists K_u \in L_1(R^n), \text{ что } |u(x)|(1+|x|)^{-N} \leq K_u(x) \right\}.$$

ЛЕММА 2. Если $u \in S_N$, то $u_\nu(x)$ сходится в весовом пространстве $L_{1,-N}(R^n)$ и существует последовательность $\{\nu_k\}$, $\lim_{k \rightarrow \infty} \nu_k = 0$, такая, что $\lim_{\nu_k \rightarrow 0} u_{\nu_k}(x) = u(x)$, для почти всех $x \in R^n$.

Введем следующее определение:

Определение. Пусть $u; f \in S_N$ функция u называется обобщенным решением уравнения

$$P(D)u = f, \quad (5)$$

если для любой функции $u \in S$

$$(u; P(-D)\varphi) = (f; \varphi)$$

Имеет место следующее представление:

ТЕОРЕМА 1. Пусть $u \in S_N'$ – обобщенное решение уравнения (5).

Тогда почти для всех $x \in R^n$ имеет место представление:

$$u(x) = u_h(x) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}}} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{\varepsilon}^h d\nu \int_{R^n} f(t) \hat{G}_1(t-x; \nu) dt \quad (6)$$

Данное представление является обобщением известных многих представлений в частности, тогда $\forall u \in L_p^{\aleph}$ обозначим $\sum_{\alpha \in \partial' \aleph} D^\alpha u = f$, тогда для данного набора мультииндексов \aleph обозначим через $L_p^{\aleph} = \left\{ u; \text{ для которых } D^\alpha u \in L_p; \forall \alpha \in \partial' \aleph \right\}$, и пусть \aleph правильный многогранник.

а) если $P(D) = D_1^{2m} + \dots + D_n^{2m}$, то получим интегральное представление в пространстве $W_p^m(R^n)$;

б) если $P(D) = D_1^{2m_1} + \dots + D_n^{2m_n}$, то получим представление в векторном пространстве $W_p^m(R^n)$;

в) если \aleph вполне правильный многогранник, то получим представление в мультианизотропном пространстве $W_p^{\aleph}(R^n)$.

Применяя представление (6), изучим поведения решений уравнения $P(D)u = f$ на бесконечности.

ЛЕММА 3. Пусть, $u \in S_N'$ – обобщенное решение уравнения $P(D)u = f$. Тогда для любого $\rho \in Z_n^+$ имеет место неравенство:

$$\sup_{x \in R^n} |D^\rho u_{h_1}(x) - D^\rho u_{h_2}(x)| \leq C(h_1^{-2} - h_2^{-2}) \|f\|_{L_{p,\beta}}, \quad (7)$$

где C – постоянное число, не зависящее от u, h, f , $1 < h_1 < h_2$, $r > 0$ число, которое определяется через ρ от многогранника \aleph и от параметров p, β принадлежности f пространству $L_{p,\beta}$, а $L_{p,\beta} = \left\{ f; (1+|x|)^\beta \cdot f \in L_p(R^n) \right\}$.

Из неравенства (7) следует, что $D^\rho u_\nu(0)$ имеет предел при $\nu \rightarrow \infty$. Исходя из этого, обозначим:

$$C_\rho = \lim_{\nu \rightarrow \infty} D^\rho u_\nu(0) = \lim_{\nu \rightarrow \infty} (2\pi)^{-\frac{n}{2}} \int_{R^n} u(t) \int_{R^n} e^{-it\xi} (i\xi)^\rho G_0(\xi; \nu) d\xi dt,$$

$$J(x) = \lim_{h \rightarrow 0} (2\pi)^{-\frac{n}{2}} \int_h^{h-x} dv \int_{R^n} f(t) \int_{R^n} e^{-i(t-x)\xi} G_1(\xi; \nu) d\xi dt.$$

Тогда для обобщенного решения $u \in S_N'$ имеет место представление:

$$u(x) = \sum_{|\rho| \leq m} C_\rho \frac{x^\rho}{\rho!} + J(x), \quad (8)$$

где m определяется через многогранник \aleph . Формула (8) непосредственно следует из представления (6) и из леммы 3.

Для поведения решения уравнения (5) имеет место следующая теорема:

ТЕОРЕМА 2. Пусть $u \in S_N'$ – обобщенное решение уравнения $P(D)u = f$, где $f \in L_{p,\beta}$. Тогда существует такой многочлен $Q_{m_1 \dots m_n}(x)$ по каждой переменной порядка m_i , что $Q_{m_1 \dots m_n}(x)$ принадлежит ядру оператора P , $Q_{m_1 \dots m_n}(x) - u(x) \rightarrow 0$ при $x_i \rightarrow \infty$ для почти всех $x' \in R^{n-1}$ $x' = (x_1, \dots, x_{j-1}, x_{j+1}, \dots, x_n)$,

$$\|u - Q_{m_1 \dots m_n}\|_{L_q} \leq C \|f\|_{L_{p,\beta}}, \quad \text{где } \left(\frac{1}{p} - \frac{1}{q} \right) |\lambda| = 1.$$

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] *Бесов О.В., Ильин В.П., Никольский С.М.* Интегральное представление функций и теоремы вложения. М., 1975, Наука.
- [2.] *Успенский С.В., Чистяков Б.Н.* О выходе на полином решений одного класса псевдодифференциальных уравнений при стремлении $|x| \rightarrow \infty$, Сибирский математический журнал 1975, т.16, № 5. СС.1053–1070.
- [3.] *Карпетян Г.А.* О стабилизации в бесконечности к полиному решений одного класса гипоэллиптических уравнений. Тр. МИАН СССР, 187, 1989. СС. 116–129.
- [4.] *Казарян Г.Г., Маркарян В.Н.* Число Зайденберга-Тарского для двумерных вырождающихся многочленов. Изв. НАН Армении, Сер. Мат.,39, № 6, 2004. СС 3–16.

ЗАДАЧА КОШИ ДЛЯ ОДНОГО КЛАССА СЛАБО ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

В.Н. Маргарян

Аннотация

В данной статье доказывается разрешимость задачи Коши в мульти-анизотропных классах Жевре для одного класса слабо гиперболических уравнений.

MSC 2010 numbers: 12E10

Ключевые слова: слабо гиперболические уравнения, задача Коши, мультианизотропные классы Жевре.

ԿՈՇՈՒ ԽՆԳԻՐ ԹՈՒՅԼ ՀԻՊԵՐԲՈԼԻԿ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ՄԻ ԳԱՍԻ ՀԱՄԱՐ

Վ. Մարգարյան

Ամփոփում

Թույլ հիպերբոլիկ հավասարումների մի դասի համար ապացուցվում է Ժևրեի մուլտիանիզոտրոպ դասերում Կոշու խնդրի լուծելիությունը:

MSC 2010 numbers: 12E10

Հիմնաբառեր՝ թույլ հիպերբոլիկ հավասարումներ, Կոշու խնդիր, Ժևրեի մուլտիանիզոտրոպ դասեր:

THE CAUCHY PROBLEM FOR A CLASS OF WEAKLY HYPERBOLIC EQUATIONS

V. Margaryan

Summary

The solvability of the Cauchy problem in multi-anisotropic Gevrey classes is proved for a class of weakly hyperbolic equations.

MSC 2010 numbers: 12E10

Keywords: weakly hyperbolic equations, Cauchy problem, multi-anisotropic Gevrey classes.

Пусть, N – множество натуральных чисел, $N_0 = N \cup \{0\}$, N_0^n – множество n -мерных мультииндексов, т.е. точек $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$, $\alpha_j \in N_0$, $j = 1, \dots, n$, R^n – n -мерное вещественное евклидово пространство и $R_+^n \equiv \{\xi = (\xi_1, \dots, \xi_n) \in R^n, \xi_j \geq 0, j = 1, \dots, n\}$.

Определение 1. (см. [1]). Многогранник $M \subset R_+^n$ называется вполне правильным (в.п.), если компоненты внешних нормалей $(n-1)$ -мерных некоординатных граней положительны.

Для в.п. многогранника M через $M^0 \cup \Lambda(M)$ обозначим: M^0 – множество вершин многогранника M , $\Lambda(M)$ – множество всех нормалей $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_n)$, $\min\{\lambda_j, 1 \leq j \leq n\} = 1$ $(n-1)$ -мерных некоординатных граней M

Через A^n обозначим множество тех в.п. многогранников $M \subset R_+^n$ для которых

$$d(\lambda) \equiv \max_{v \in M} (v, \lambda) \equiv \max_{v \in M} \sum_{j=1}^n v_j \lambda_j < 1 \quad \forall \lambda \in \Lambda(M).$$

Определение 2. (см., например, [2]). Многочлен $P(\xi) = P(\xi_1, \dots, \xi_n) \equiv P(\xi_1, \xi') = \sum_{j=0}^m P_j(\xi_1, \xi')$ где $\xi' = (\xi_2, \dots, \xi_n)$ $m = \text{ord} P$, P_j однородный многочлен порядка $j: j = 0, \dots, m$ называется слабо гиперболическим относительно ξ_1 , если для любого $\xi' \in R^{n-1}$ корни многочлена $P_m(\xi_1, \xi')$ вещественны.

Пусть, $M \in \Lambda^{n-1}$

$$h_M(\xi') \equiv \sum_{v \in M^0} |\xi'|^v \equiv \sum_{v \in M^0} |\xi_2|^{v_2} \dots |\xi_n|^{v_n}.$$

Определение 3. (см.: [3]). Многочлен $P(\xi)$ называется h_M $(M \cup \Lambda^{n-1})$ гиперболическим относительно ξ_1 , если существует постоянная $c = 0$, что

$$P(\xi_1 + ir_1 \xi') \neq 0 \quad \forall (r_1 \xi') \cup R^{n-1}, |r_1| \geq c.$$

Известно (см., например, [2] и [4]), что если многочлен P $h_M(M \cup R^{n-1})$ гиперболическим относительно ξ_1 , то P слабо гиперболическим относительно ξ_1 и обратно, если P слабо гиперболическим относительно

ξ_1 , то существует число $s = 0$ такое, что многочлен

$$h(\xi') \equiv 1 + |\xi'|^s = 1 + \left(\sqrt{\sum_{j=2}^n \xi_j^2} \right)^s \text{ гиперболичен относительно } \xi_1.$$

Нами доказана:

Теорема 1. Пусть $M \in \Lambda^{n-1}$ а $P(\xi)$ слабо гиперболичен относительно ξ_1 , если существует постоянная $c = 0$ такая, что при всех, то $\xi \cup R^n \sum_{\alpha} |D^{\alpha}(P - P_m)(\xi)|^2 h_M^{2(\alpha)}(\xi) \leq c \sum_{\alpha} |D^{\alpha} P_m(\xi)|^2 h_M^{2(\alpha)}(\xi)$ многочлен P h_M гиперболичен относительно ξ_1 .

Для многогранника $M \in \Lambda^n$ через \tilde{M} обозначим в.п. многогранник R_+^{n+1} , вершинами которой являются точки $(0, \nu)$ $\nu \in M^0$ точка $\left(\max_{\nu \in M} \max_{\lambda \in \Lambda(M)} (\nu, \lambda), 0, \dots, 0 \right)$.

Для $M \in \Lambda^n$ через Γ^M обозначим следующий мультианизотопный класс Жевре $\Gamma^M = \{f \in C^{\infty}$ для любого компакта $K \in R^n$, $\exists c = c(K, f) > 0$ т.ч. $\sup_{x \in K} |D^{\alpha} f(x)| \leq c^{j+1} j^j$
 $\forall \alpha \in M(j), j = 1, 2, \dots\}$, $j = 1, 2, \dots$,

$$\text{где } M(j) \equiv \left\{ \nu \in R^n, \frac{\nu}{j} \equiv \left(\frac{\nu_1}{j}, \dots, \frac{\nu_1}{j} \right) \in M \right\}.$$

Нами доказана следующая:

Теорема 2. Пусть, для $M \in \Lambda^n$ слабо гиперболического многочлена P относительно ξ_1 выполняется оценка (1). Тогда для любого $M \in \Lambda^{n-1}$ такого, что при некотором $\delta > 1$ $M(\delta) \subset \mathcal{H}$ следующая задача Коши:

$$\begin{cases} P(D)U = 0 & x_1 > 0 \\ D_1^j U(0, x') = f_j(x') \in \Gamma^M \cap C_0^{\infty} & j = 0, \dots, m-1 \end{cases}$$

имеет, при том, единственное решение из Γ^M .

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] Михайлов В.П. О поведении на бесконечности одного класса многочленов. Труды МИАН СССР 91. СС. 59–91 (1967).

- [2.] *Calvo D.* Multianisotropic Gevrey Classes and Cauchy Problem Ph. D. Thesis in Mathematics Universita degli Study Pisa (2000y).
- [3.] *Казарян Г.Г., Маргарян В.Н.* О гиперболических многочленах с весом. Изд-во НАН. Арм., т.49 № 5. СС. 23–39 (2014).
- [4.] *Hormander. L.* The analysis of Linear Partial Differential Operators vol 2. Springer-Verlag (1983).

AEROELASTIC STABILITY OF RECTANGULAR PLATE IN SUPERSONIC GAS FLOW

M. Mikilyan
mikilyan@rau.am

Summary

The nonlinear stability of a flexible plate immersed in a high speed gas flow is considered. The model takes into account quadratic and cubic aerodynamic nonlinearities as well as cubic geometric nonlinearities. It is shown that the inclusion of quadratic aerodynamic nonlinear components can lead to the appearance of “amplitude-frequency” phenomena in both the pre-critical and post-critical flow speed regimes.

Keywords: flutter, nonlinear stability, supersonic gas flow, “amplitude-frequency” dependence.

АЭРОУПРУГАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ГАЗА

М.А. Микилян

Аннотация

Рассматривается нелинейная устойчивость гибкой пластины, погруженной в сверхзвуковой поток газа. Модель учитывает квадратичную и кубическую аэродинамические нелинейности, а также кубические геометрические нелинейности. Показано, что включение квадратичных аэродинамических нелинейных компонентов может привести к появлению “амплитудно-частотных” явлений и в режиме докритической, и в режиме после-критической скорости потока.

Ключевые слова: дрожание, нелинейная устойчивость, сверхзвуковой поток газа, “амплитудно-частотная” зависимость.

ՌԻՂՂԱՆԿՅԱՆ ԹԻԹԵՂԻ ՇԵՐՏԻ ԱԷՐՈՃԿՈՒՆ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅՈՒՆԸ ԳԵՐՉԱՅՆԱՅԻՆ ԳԱԶԻ ՀՈՍՔԻ ՄԵՉ

Մ.Ա. Միկիլյան

Ամփոփում

Դիտարկվում է ճկուն փիթեղի շերտի գծային կայունությունը գերձայնային գազի հոսքի մեջ: Մոդելը հաշվարկում է քառակուսային և խորանարդային

աէրոդինամիկ ոչգծայնությունները, ինչպէս նաև խորանարդային երկրաչափական ոչգծայնությունները: Յույց է տրված, որ քառակուսային աէրոդինամիկ ոչգծային բաղադրիչների ներառումը կարող է հանգեցնել «ամպլիտուդային հաճախականային» երևույթների ինչպէս նախնական կրիտիկական, այնպէս էլ հետկրիտիկական հոսքի արագության ռեժիմներում:

Հիմնաբառեր՝ տատանում, ոչգծային կայունություն, գերձայնային գազի հոսք, «ամպլիտուդային հաճախականային» կախվածություն:

Introduction

There are numerous studies devoted to the issues of stability of plates and shells in supersonic gas flow. Information about these studies can be found in the monographs [1,2,3] and in a review paper [6]. There are some works also devoted to the investigation of the stability of long rectangular plate under the influence of across the thickness variable temperature field and in a supersonic gas flow [7]. In this work in non-linear formulation we'll consider the problem of stability of rectangular plate in a supersonic gas flow (with the unperturbed velocity directed along the short edges of the plate). The effect of flowing stream speed on the dependence of “amplitude-frequency” is studied.

Main equations and relations

Let's consider a thin isotropic rectangular plate of constant thickness h . Let the plate material obeys the generalized Hooke's law, and at each point has three planes of elastic symmetry, the main directions of which coincide with the directions of the orthogonal coordinate lines α, β, γ . The coordinate plane α, β coincides with the middle plane of the plate.

A supersonic gas flow with an unperturbed velocity U , is directed along the axis 0α , on one side of the panel. To investigate the aero-elastic stability of the examined plate the following assumptions are considered [1-4]:

- a) the Kirchhoff hypothesis on non-deformable normal;
- b) for the flexible plate the normal displacements are comparable with the thickness of the plate [8];
- c) the Piston Theory Aerodynamics (PTA) is used when calculating the aerodynamic pressure:

$$p = p_{\infty} \left(1 + \frac{\alpha - 1}{2} \frac{v_3}{a_{\infty}} \right)^{\frac{2\alpha}{\alpha - 1}}, \quad (1)$$

where p is the gas pressure at the plate's surface, $a_\infty^2 = \varkappa p_\infty \rho_\infty^{-1}$ is the sound velocity for the undisturbed gas, p_∞ and ρ_∞ are the pressure and gas density in undisturbed state, \varkappa is the isentropic gas coefficient, v_3 is the normal component of the speed of points of plate's surface.

Based on these assumptions the non-linear aero-elastic governing equations can be cast as:

$$a_{11} \frac{\partial^4 F}{\partial \alpha^4} + (a_{66} + 2a_{12}) \frac{\partial^4 F}{\partial \alpha^2 \partial \beta^2} + a_{22} \frac{\partial^4 F}{\partial \beta^4} + \frac{\partial^2 w}{\partial \alpha^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \beta^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \alpha \partial \beta} \right)^2 = 0, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial \alpha^4} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial \alpha^2 \partial \beta^2} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial \beta^4} - \frac{\partial^2 w}{\partial \alpha^2} \frac{\partial^2 F}{\partial \beta^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial \beta^2} \frac{\partial^2 F}{\partial \alpha^2} + \\ & + 2 \frac{\partial^2 w}{\partial \alpha \partial \beta} \frac{\partial^2 F}{\partial \alpha \partial \beta} - \rho_0 h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \left(\rho_0 h \varepsilon + \frac{\varkappa p_\infty}{a_\infty} \right) \frac{\partial w}{\partial t} - \varkappa p_\infty \left[M \frac{\partial w}{\partial \alpha} + \right. \\ & \left. + \frac{\varkappa + 1}{4} M^2 \left(\frac{\partial w}{\partial \alpha} \right)^2 + \frac{\varkappa + 1}{12} M^3 \left(\frac{\partial w}{\partial \alpha} \right)^3 \right] = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

Here

$$\begin{aligned} D_{ik} &= B_{ik} \frac{h^3}{12}, \quad c_{ik} = B_{ik} h, \quad a_{11} = \frac{c_{11}}{\Omega}, \quad a_{22} = \frac{c_{22}}{\Omega}, \quad a_{12} = \frac{c_{12}}{\Omega}, \\ a_{66} &= \frac{1}{c_{66}}, \quad \Omega = c_{11} c_{22} - c_{12}^2, \quad M = \frac{U}{a_\infty}, \quad a_\infty = \frac{\varkappa p_\infty}{\rho_\infty}, \end{aligned}$$

$w(\alpha, \beta, t)$ – is the plate deflection, B_{ik} – are elasticity coefficients, M – is the Mach number of undisturbed flow, a_∞ – is the sound velocity for the undisturbed gas, \varkappa – is the isentropic gas coefficient, ρ_0 – is the density of plate's material, p_∞ and ρ_∞ – are the pressure and gas density in undisturbed state, ε – is the coefficient of linear attenuation, $F = F(\alpha, \beta, t)$ – is the stress function.

To investigate the issues of stability of the examined system the boundary conditions must be added to the equations (2)–(3).

Reduction to the system of ordinary differential equations

Let's consider the orthotropic plate which edges are hinged supported along the contour and can freely move. Then the boundary conditions can be represented as:

$$\text{for } \alpha = 0, \quad \alpha = a$$

$$w = 0, \quad M_\alpha = -D_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial \alpha^2} - D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial \beta^2} = 0, \quad S^0 = 0, \quad T_\alpha^0 = -p_\alpha^0,$$

for $\beta = 0, \beta = b$

$$w = 0, \quad M_\beta = -D_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial \beta^2} - D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial \alpha^2} = 0, \quad S^0 = 0, \quad T_\beta^0 = -p_\beta^0,$$

where T_α^0, T_β^0, S – are average values of tangential forces at the edges of the plate.

The obtained linear problem (3) can be solved using as an approximation the solution in the form [2]

$$w(\alpha, \beta, t) = f_{11}(t) \sin \lambda_1 \alpha \cdot \sin \mu_1 \beta + f_{21}(t) \sin \lambda_2 \alpha \cdot \sin \mu_1 \beta, \quad \left(\lambda_i = \frac{i\pi}{a}, \mu_k = \frac{k\pi}{b} \right). \quad (6)$$

Herein $f_{ik}(t)$ – functions of time t , is to be determined.

To determine the unknown functions $f_{ik}(t)$ let's use the equation (3). Substituting (6) into the equation (2) and using the Bubnov-Galerkin method, after some transformations, in the case of orthotropic plate the following non-linear system of ordinary differential equations is obtained with respect to the dimensionless functions $x_1 = f_{11}(t)/h, x_2 = f_{21}(t)/h$:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x_1}{d\tau^2} + \chi \frac{dx_1}{d\tau} + x_1 - \frac{2}{3} K v x_2 + K v^2 \left[\alpha_{11} x_1^2 + \alpha_{12} x_2^2 + \right. \\ \left. + v x_2 (\beta_{11} x_1^2 + \beta_{12} x_2^2) \right] + Q x_1 (\gamma_{11} x_1^2 + \gamma_{12} x_2^2) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x_2}{d\tau^2} + \chi \frac{dx_2}{d\tau} + \gamma^2 x_2 + \frac{2}{3} K v x_2 + K v^2 \left[\alpha_{21} x_1 x_2 + v x_1 (\beta_{21} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2) \right] + \\ + Q x_2 (\gamma_{21} x_1^2 + \gamma_{22} x_2^2) = 0. \end{aligned}$$

Herein, along with the dimensionless time $\tau = \omega_1 t$, the following notations are done:

$$\omega_i^2 = \frac{1}{\rho_0 h} \left[D_{11} \lambda_i^4 + 2(a_{66} + 2a_{12}) \lambda_i^2 \mu_1^2 + D_{22} \mu_1^4 - \lambda_i^2 p_\alpha - \mu_1^2 p_\beta \right] \quad (i=1,2), \quad (8)$$

$$K = \frac{4\alpha p_\infty}{\rho_0 \omega_1^2 h^2}, \quad Q = \frac{4}{16\rho_0 \omega_1^2}, \quad L = \frac{1}{\rho_0 h \omega_1^2}, \quad v = M \frac{h}{a}, \quad \gamma = \frac{\omega_2}{\omega_1}, \quad \chi = \frac{2}{\omega_1} \left(\varepsilon + \frac{\alpha p_\infty}{\rho_0 h a_\infty} \right),$$

$$\alpha_{11} = \frac{2}{9}(\alpha + 1), \quad \alpha_{12} = \frac{56}{45}(\alpha + 1), \quad \alpha_{21} = \frac{16}{45}(\alpha + 1), \quad (9)$$

$$\beta_{11} = \beta_{21} = \frac{\pi^2}{40}(\alpha + 1), \quad \beta_{22} = \frac{11\pi^2}{70}(\alpha + 1), \quad \beta_{12} = -\frac{9\pi^2}{70}(\alpha + 1), \quad (10)$$

$$\gamma_{11} = \frac{\lambda_1^4}{a_{22}} + \frac{\mu_1^4}{a_{11}}, \gamma_{22} = \frac{\lambda_2^4}{a_{22}} + \frac{\mu_1^4}{a_{11}}, \quad \gamma_{12} = \gamma_{21} = 4\gamma_{11} + \frac{81\lambda_1^4\mu_1^4}{\Delta_{12}} + \frac{\lambda_1^4\mu_1^4}{\Delta_{32}}, \quad (11)$$

$$\Delta_{\lambda_i\mu_2} = a_{11}\lambda_i^4 + (a_{66} + 2a_{12})\lambda_i^2\mu_2^2 + a_{22}\mu_2^4, \quad (i=1,3),$$

where ω_1 and ω_2 – are first and second frequencies of small natural vibrations of the plate, v – is the reduced speed parameter.

Corresponding to the system (7) the linear system has solutions in the form $x_i = y_i \exp(\lambda\tau)$. In the case of small values of the parameter v , all characteristic indices λ lie in the left half-space of complex variable and the trivial solution $w = 0$ is asymptotically stable with respect to small disturbances. The value of the parameter $v = v_*$, at which two of characteristic indices become pure imaginary and the rest of parameters are in the left half-space, is a critical one and corresponds to the critical panel flutter speed in the linear formulation of the examined problem:

$$v^* = \frac{3}{4} \frac{\gamma^2 - 1}{k} \sqrt{1 + \frac{2\chi^2(\gamma^2 + 1)}{(\gamma^2 - 1)^2}}. \quad (12)$$

Let's note, that characterizing disturbances behavior of orthotropic plate [5] the system of non-linear equations (7) and formula (12) are externally similar to the analogous system and formula in the case of isotropic plate, obtained in [2].

Equations, calculating the dependency “amplitude-frequency”

Let's investigate the non-linear problem describing via the non-linear system (7). This system is differs from the similar system of stability of flexible plates loading by the non-conservative forces by the presence of terms with the quadratic non-linearity. In the system of equation (7) asymmetric quadratic nonlinearities of aerodynamic and aero-elastic origin are included. These types of nonlinearities are inherent to the problems of the stability of flexible shells. Therefore, the approximate periodic solution of (7) is presented in the form [5]

$$\begin{aligned} x_1 &= A_1 \cos \theta\tau + B_1 \sin \theta\tau + C_1 + \dots, \\ x_2 &= A_2 \cos \theta\tau + B_2 \sin \theta\tau + C_2 + \dots \end{aligned} \quad (13)$$

Here A_i , B_i , C_i and θ ($i=1,2$) – are unknown constants, where the dots denote terms containing harmonics. The structure of solutions (13) is differs from the existing solutions [2,3] by the presence of free terms $C_i \neq 0$, which presence is characterized by the quadratic nonlinearity.

The solution (15) is substituted into equation (10) and the coefficients at the free member, $\cos \theta\tau$ and $\sin \theta\tau$, are set equal to zero, while the terms containing harmonics are neglected. The obtained system of nonlinear

algebraic equations is quite cumbersome and is not presented here. To obtain the approximate solution of this system it is assumed that:

- a) the damping is small enough ($\chi|B_i| \ll |A_i|$, $|B_i| \ll |A_i|$);
- b) the considered aero-thermo-elastic system reaches steady vibrations with finite amplitude around the state, which is infinitesimally different from the unperturbed state ($|A_i| \gg |C_j|$; $j = 1,2$).

According to the noted assumptions and neglecting the degrees above the first and the product of B_i , and C_i , by excluding B_i , and C_i , the nonlinear system can be represented by the following sub-system of nonlinear equations

Equations obtained by equating to zero the free terms

$$\begin{aligned}
& C_1 - \frac{2}{3}kvC_2 + \frac{1}{2}kv^2(\alpha_{11}A_1^2 + \alpha_{12}A_2^2) + kv^3A_2(\beta_{11}A_1C_1 + \beta_{12}A_2C_2) + \\
& + \frac{1}{2}kv^3C_2(\beta_{11}A_1^2 + \beta_{12}A_2^2) + QA_1(\gamma_{11}A_1C_1 + \gamma_{12}A_2C_2) + \frac{1}{2}QC_1(\gamma_{11}A_1^2 + \gamma_{12}A_2^2) = 0, \\
& \gamma^2C_2 + \frac{2}{3}kvC_1 + \frac{3}{4}kv^2\alpha_{21}A_1A_2 + kv^3A_1(\beta_{21}A_1C_1 + \beta_{22}A_2C_2) + \\
& + \frac{1}{2}kv^3C_1(\beta_{21}A_1^2 + \beta_{22}A_2^2) + QA_2(\gamma_{21}A_1C_1 + \gamma_{22}A_2C_2) + \frac{1}{2}QC_2(\gamma_{21}A_1^2 + \gamma_{22}A_2^2) = 0,
\end{aligned} \tag{14}$$

Equations obtained by equating to zero the coefficients of $\cos \theta\tau$

$$\begin{aligned}
& (1 - \theta^2)A_1 + \chi\theta B_1 - \frac{2}{3}kvA_2 + 2kv^2(\alpha_{11}A_1C_1 + \alpha_{12}A_2C_2) + \\
& + \frac{3}{4}kv^3A_2(\beta_{11}A_1^2 + \beta_{12}A_2^2) + \frac{3}{4}QA_1(\gamma_{11}A_1^2 + \gamma_{12}A_2^2) = 0, \\
& (\gamma^2 - \theta^2)A_2 + \chi\theta B_2 + \frac{2}{3}kvA_1 + \alpha_{21}kv^2(A_1C_1 + A_2C_2) + \\
& + \frac{3}{4}kv^3A_1(\beta_{21}A_1^2 + \beta_{22}A_2^2) + \frac{3}{4}QA_2(\gamma_{21}A_1^2 + \gamma_{22}A_2^2) = 0,
\end{aligned} \tag{15}$$

Equations obtained by equating to zero the coefficients of $\sin \theta\tau$

$$\begin{aligned}
& (1 - \theta^2)B_1 - \frac{2}{3}KvB_2 - \chi\theta A_1 + \frac{1}{2}kv^3\beta_{11}A_1A_2B_1 + \frac{1}{4}kv^3(\beta_{11}A_1^2 + 3\beta_{12}A_2^2)B_2 + \\
& + \frac{1}{4}Q(3\gamma_{11}A_1^2 + \gamma_{12}A_2^2)B_1 + \frac{1}{2}Q\gamma_{12}A_1A_2B_2 = 0, \\
& (1 - \theta^2)B_2 - \chi\theta A_2 + \frac{2}{3}kvB_1 + \frac{1}{4}kv^3(3\beta_{21}A_1^2 + \beta_{22}A_2^2)B_1 + \\
& + \frac{1}{2}kv^3\beta_{22}A_1A_2B_2 + \frac{1}{2}Q\gamma_{21}A_1A_2B_1 + \frac{1}{4}Q(\gamma_{21}A_1^2 + 3\gamma_{22}A_2^2)B_1 = 0.
\end{aligned} \tag{16}$$

The third subsystem (16) takes into account the damping terms. By taking into account the smallest value of damping ($\chi \approx 0$), from the equations of this subsystem, performing a linearization, one obtains

$$B_1 \approx 0, \quad B_2 \approx 0 \quad (17)$$

From the first sub-system (14) determining C_1, C_2 as a function of A_1, A_2 and v and substituting into the second sub-system (15) one can obtain the following system of non-linear equations:

$$A_1(1 - \theta^2) - \frac{2}{3}KvA_2 + 2Kv^2\alpha_{11}A_1C_1 + 2Kv^2\alpha_{12}A_2C_2 + \frac{3}{4}Kv^3A_2(\beta_{11}A_1^2 + \beta_{12}A_2^2) + \frac{3}{4}QA_1(\gamma_{11}A_1^2 + \gamma_{12}A_2^2) = 0 \quad (18)$$

$$A_2(\gamma^2 - \theta^2) + \frac{2}{3}KvA_1 + Kv^2\alpha_{21}(A_1C_2 + A_2C_1) + \frac{3}{4}Kv^3A_1(\beta_{21}A_1^2 + \beta_{22}A_2^2) + \frac{3}{4}QA_2(\gamma_{21}A_1^2 + \gamma_{22}A_2^2) = 0 \quad (19)$$

In equations (18) and (19)

$$C_1 = \frac{1}{\Delta} \left[-\frac{1}{2}Kv^2(\alpha_{11}A_1^2 + \alpha_{12}A_2^2)\Delta_2 + \frac{1}{2}Kv^2\alpha_{21}A_1A_2\Delta_4 \right] \quad (20)$$

$$C_2 = \frac{1}{\Delta} \left[-\frac{1}{2}Kv^2\alpha_{21}A_1A_2\Delta_1 + \frac{1}{2}Kv^2(\alpha_{11}A_1^2 + \alpha_{12}A_2^2)\Delta_3 \right]$$

where the following notations are done;

$$\Delta_1 = 1 + \frac{3}{2}Q\gamma_{11}A_1^2 + \frac{1}{2}Q\gamma_{12}A_2^2 + Kv^3\beta_{11}A_1A_2$$

$$\Delta_2 = \gamma^2 + Kv^3\beta_{22}A_1A_2 + \frac{3}{2}Q\gamma_{22}A_2^2 + \frac{1}{2}Q\gamma_{21}A_1^2$$

$$\Delta_3 = \frac{2}{3}Kv + \frac{3}{2}Kv^3\beta_{21}A_1^2 + \frac{1}{2}Kv^3\beta_{22}A_2^2 + Q\gamma_{21}A_1A_2$$

$$\Delta_4 = -\frac{2}{3}Kv + \frac{3}{2}Kv^3\beta_{12}A_2^2 + \frac{1}{2}Kv^3\beta_{11}A_1^2 + Q\gamma_{12}A_1A_2 \quad (21)$$

$$\Delta = \Delta_1\Delta_2 - \Delta_3\Delta_4.$$

Numerical analysis

The above-brought system of non-linear equation is solved numerically with the initial set of parameters $E = 7.3 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$; $\mu = 0.34$; $\rho_0 = 2.79 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ (dural), $\alpha = 1.4$; $\rho_\infty = 1.29 \text{ kg/m}^3$ (air). On the basis of this system the dependence of the amplitude of flutter type vibrations as a function of the parameter θ is

investigated for several values of h/a and a/b . Numerical calculations brought in the Fig.1 and show, that:

- for small values of the free stream flow speed ($v < v^*$) there are no flutter type vibrations up to certain value $\theta = \theta^*$. For $\theta \geq \theta^*$ the excitement of flutter type vibrations has “hard” character, i.e. the real values of the amplitude are not available and with the further increasing of θ the amplitude increases (the perturbation is finite, but sufficiently enough).
- by gradually increasing the free stream flow speed ($v \geq v^*$), one can observe that starting from the certain value $\theta = \theta_*$ the dependence amplitude-frequency becomes a multi-value function. It means that for $\theta_* < \theta < \theta^*$ there are two values of the amplitude of flutter type vibrations. One of them decreases and becomes to zero at $\theta = \theta_*$, and the other one increases with the increasing θ .
- for small values the free stream flow speed transition from one type to another can be adjusted properly choosing the geometric parameters of the plate.

At the end let’s note again that the above-mentioned new phenomena take place due to the quadratic aerodynamic non-linearity.

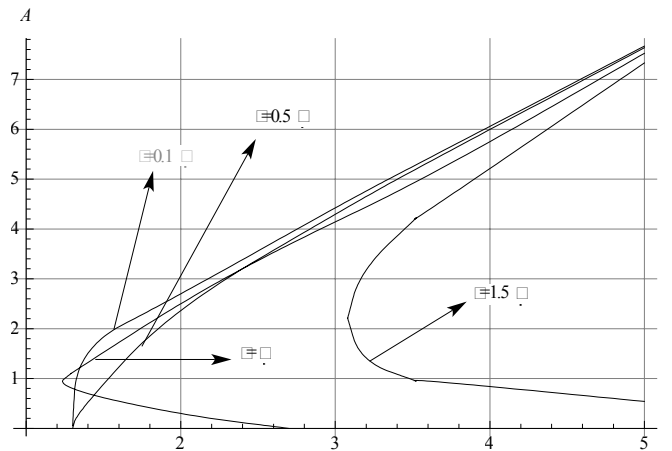


Figure 1. Dependence “amplitude-frequency” for several values of the free stream flow speed, when $h/a=1/200$, $b/a=3$

Summary/Conclusions

This paper provides insights into the stability of flexible isotropic rectangular plates in supersonic flow, by revealing an amplitude-frequency dependency behavior for such plates in pre- and post- critical flight

conditions. Flutter and post-flutter behaviors are discussed to highlight the important effect of the structural and aerodynamic nonlinearities inherently present for plates in high speed flows. Depending on plate's geometrical parameters and flowing stream speed two type flutter behaviors are possible and graphical interpretation are provided along with pertinent conclusions.

REFERENCES

- [1] *Ambartsumian S.A.* The general theory of anisotropic shells. M.: Nauka, 1974. 446p.
- [2] *Bolotin V.V.* Non-conservative problems of theory of elastic stability. M.: Fizmatgiz, 1961. 339p.
- [3] *Volmir A.S.* Nonlinear dynamics of plates and shells. M. Nauka, 1972. 432p.
- [4] *Ashley H., Zartarian C.* Piston theory – a new aerodynamic tool for the aeroelastician. Journ. Aeronaut. Sci. 23, № 6, 1956
- [5] *Baghdasaryan G.Y.* On the stability of orthotropic shells in supersonic gas flow, Izv.AN USSR OTN Mechanics and Engineering, 1961, № 4, PP. 92–98
- [6] *Novichkov Y.N.* Flutter of plates and shells. //Results of science and technology. Mechanics of deformable solids. - Moscow: Nauka, 1978. vol. 11. PP. 67–122.
- [7] *Baghdasaryan G.Y., Mikilyan M.A. & Marzocca P.* On the Stability of Flexible Orthotropic Rectangular Plate in Supersonic Flow: Amplitude-Speed Dependency in Pre- and Post- Critical Flight Conditions. Journal of Aerospace Engineering, 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000246 (Jul. 19, 2012), ISSN: 0893-1321, 2012

ИНФОРМАТИКА

СЛУЧАЙНАЯ НЕРЕГУЛЯРНАЯ БЛОЧНО- ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СЕТЬ. АЛГОРИТМЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ

С. Аветисян, М. Самвелян, М. Карапетян

avetisian@bk.ru, mikayel_samvelyan@mentor.com,
m.karapetyan@gmail.com

Аннотация

В данной работе рассматривается класс случайных *нерегулярных* блочно-иерархических сетей, дается его определение, описание алгоритмов генерации и вычисления свойств сети. Данные алгоритмы для рассматриваемого класса сетей, в отличии от известных алгоритмов, более эффективны как по времени вычисления, так и по используемой памяти и могут быть использованы при исследовании топологических свойств случайных *нерегулярных* блочно-иерархических сетей. Алгоритмы реализованы в созданной авторами системе для исследования топологических свойств случайных сетей.

Ключевые слова: случайные сети, статистические свойства, алгоритмы.

ՊԱՏԱՀԱԿԱՆ ԱՆԿԱՆՈՆ ԲԼՈՔ-ՀԱՄԱԿԱՐԳԱՅԻՆ ՑԱՆՑ. ՀԻՄՆԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿՄԱՆ ԱԼԳՈՐԻԹՄ

Խ.Ա.Ավետիսյան, Մ.Է.Սամվելյան, Մ. Կարապետյան

Ամփոփում

Հոդվածում քննարկվում է պատահական անկանոն բլոք-համակարգային ցանցերի դասը, տրվում են նրա սահմանումը, սերնդի ալգորիթմների նկարագրությունը և ցանցի հատկանիշների հաշվարկները: Ի տարբերություն հայտնի ալգորիթմների՝ ցանցերի ուսումնասիրվող դասի համար տվյալ ալգորիթմները ավելի արդյունավետ են իրենց հաշվարկման ժամանակի և օգտագործված հիշողության շնորհիվ, հետևաբար նրանք կարող են կիրառվել պատահական անկանոն բլոք-համակարգային ցանցերի տոպոլոգիական ա-

առանձնահատկությունները ուսումնասիրելիս: Այս ալգորիթմերը իրագործված են հեղինակների կողմից ստեղծված համակարգում պատահական ցանցերի տոպոլոգիական առանձնահատկությունները հետազոտելու նպատակով:

Հիմնաբառեր՝ պատահական ցանցեր, վիճակագրական հատկություններ, ալգորիթմեր:

RANDOM IRREGULAR BLOCK-HIERARCHICAL NETWORK: ALGORITHM FOR CALCULATING THE BASIC PROPERTIES

S. Avetisyan M. Samvelyan M. Karapetyan

Summary

The article considers the class of random irregular block-hierarchical networks, gives its definition, the description of the generation algorithms and calculations of the characteristics of the network. Unlike the known algorithms, the given algorithms for the investigated class of networks are more efficient due to both their reduced calculation time and the used memory, thus they can be applied while researching topological characteristics of random irregular block-hierarchical networks. The algorithms are implemented in the authors' system to research topological characteristics of random networks.

Keywords: random networks, statistical properties, algorithms.

1. Введение

Особый интерес в последнее время вызвали блочно-иерархические сети, которые, как выяснилось, оказались удобной моделью пространственной структуры сложных биомолекул, таких как ДНК и белки [1]. Активное изучение случайных сетей различной природы делает актуальным вопрос о разработке системы, которая способна имитировать модели случайных сетей различных типов и проводит эффективный и разносторонний анализ их топологических и статистических свойств [2].

В данной статье рассматривается класс случайных нерегулярных блочно-иерархических сетей, дается его определение и описание алгоритмов генерации и вычисления свойств сети. В регулярных блочно-иерархических сетях, которые рассмотрены в [3,4], число вложенных кластеров, а, следовательно, и число узлов в кластерах одного и того же уровня одинаково. В случае нерегулярной блочно-иерархической сети число вложенных кластеров может быть любым от 1 до \mathcal{P} , где \mathcal{P} задает максимальное число вложенных кластеров. Алгоритмы для клас-

са нерегулярных блочно-иерархических сетей, которые совпадают с алгоритмами для регулярных сетей, здесь не приводятся, можно обратиться к [3]. Для сравнения с классическими алгоритмами приведены их сложностные оценки. Все результаты работы использованы в реализации системы “Random Networks Explorer” [4], которая позволяет проводить исследование статистических свойств случайных сетей. В качестве примера приведены результаты анализа для распределения степеней регулярных и нерегулярных блочно-иерархических сетей.

2. Нерегулярная блочно-иерархическая сеть

Нерегулярная блочно-иерархическая сеть является обобщенным случаем регулярной блочно-иерархической сети [3]. Для того чтобы определить нерегулярную блочно-иерархическую сеть, дадим определение регулярной сети. Регулярная блочно-иерархическая сеть $G_{\mathbb{P}, \Gamma} \in \mathcal{G}(\mathbb{P}, \Gamma)$ определяется 2-мя параметрами \mathbb{P} : параметром ветвления и числом уровней сети, $\mathbb{P} > 1, \Gamma \geq 0$. По этим параметрам однозначно определяется число узлов сети $\{x_1, \dots, x_N\}$, $N = \mathbb{P}^\Gamma$ и разбиение на кластеры, что и определяет структуру связей регулярной блочно-иерархической сети. Сеть конструируется по уровням. На каждом новом уровне $\gamma, 0 \leq \gamma \leq \Gamma$, формируются новые кластеры посредством объединения \mathbb{P} уже построенных на предыдущем уровне кластеров и соединения некоторых из них, в результате чего образуются новые связи сети. \mathbb{P} кластеров уровня $\gamma - 1$, которые объединяются в кластеры нового уровня, являются вложенными относительно кластера нового уровня. Разбиение на кластеры представляется деревом связи, а соединения кластеров, т.е. наличие связей в сети определяются битовыми последовательностями, которыми помечены все вершины дерева связи. $M_Y^{(i)}$ – i -тый кластер уровня Y , где n_Y – количество кластеров уровня Y , M_Y – множество кластеров уровня Y ,

$$M_Y = \{M_Y^{(1)}, M_Y^{(2)}, \dots, M_Y^{(n_Y)}\}$$

$V(M_Y^{(i)})$ – узлы в кластере $M_Y^{(i)}$, а $|V(M_Y^{(i)})|$ – количество узлов в кластере $M_Y^{(i)}$. Все сети класса \mathbb{P}, Γ имеют одинаковое число узлов и одинаковое разбиение на кластеры, и отличаются выбором соединенных пар вложенных кластеров.

Для нерегулярных сетей параметр \mathbb{P} задает максимальное число разбиений на кластеры, для каждого кластера число вложенных кластеров $\leq \mathbb{P}$. Параметры \mathbb{P}, Γ однозначно не определяют разбиение на

кластеры и не задают число узлов как в регулярном случае. Для любого уровня имеем:

$$\bigcup_{i=1}^{n_\gamma} V(M_\gamma^{(i)}) = V(M_\gamma^{(1)}) = \{x_1, \dots, x_{n_\gamma}\}, \quad N \leq p^\Gamma$$

Обозначим через $Count(\gamma, i)$, $\gamma > 0$ количество кластеров, вложенных в кластер $M_\gamma^{(i)}$, $Count(0, i) = 0$. Разбиение на кластеры на уровне $\gamma > 0$ задается множеством

$$Branch(\gamma) = \{Count(\gamma, i) | 1 \leq i \leq n_\gamma\}$$

$Branch(0) = \emptyset$, и в дальнейшем не рассматривается. Очевидно, что

$$|Branch(\gamma - 1)| = \sum_{n_\gamma}^{i=1} Count(\gamma, i), \quad 1 \leq \gamma \leq \Gamma. \text{ Разбиение всей сети задается}$$

множеством

$$Branch = \{Branch(\gamma) | 1 \leq \gamma \leq \Gamma\}$$

Для заданного разбиения $Branch$ определим класс нерегулярных блочно-иерархических сетей $G \in Branch$. Сети данного класса имеют одну и ту же структуру разбиения узлов на кластеры и отличаются лишь связями между узлами сети. Класс регулярных сетей $R_{p, \Gamma}$ совпадает с классом нерегулярных сетей $G \in Branch$, если для каждого i и $\gamma, 1 \leq i \leq n_\gamma, 1 \leq \gamma \leq \Gamma$, $Count(\gamma, i) = p$. В таком случае $N = p^\Gamma$.

Для хранения и генерации сети используется дерево связи. Дерево связи сети G задается в виде помеченного $(p+1)$ -арного дерева, удовлетворяющего следующим условиям:

- На каждом уровне γ , $0 \leq \gamma \leq \Gamma$ имеется n_γ вершин $t_\gamma^{(i)}, 1 \leq i \leq n_\gamma$. Число дочерних поддеревьев у вершины равно $Count(\gamma, i)$, $Count(0, i) = 0$. Общее число вершин дерева связи равно числу кластеров сети G .
- Каждому кластеру $M_\gamma^{(i)}$ сети G ставится в соответствие поддерево, корнем которого является вершина дерева $t_\gamma^{(i)}$. Узлам кластера $M_\gamma^{(i)}$ соответствуют листья (конечные вершины) соответствующего поддерева.
- Вершина дерева $t_\gamma^{(i)}, 1 \leq \gamma \leq \Gamma$ помечена последовательностью нулей и единиц $bitmap(\gamma, i)$, длиной $\frac{k * (k-1)}{2}$, $k = Count(\gamma, i)$.

Битовая последовательность $bitmap(\gamma, i)$ описывает соединения между кластерами уровня $\gamma-1$, вложенными в кластер $M_\gamma^{(i)}$. Назовем $bitmap(\gamma, i)$ вектором связи вершины дерева $t_\gamma^{(i)}$.

Дерево связи нерегулярной блочно-иерархической сети G определяется структурой разбиения на кластеры:

$$Branch = \{Branch(\gamma) | 1 \leq \gamma \leq \Gamma\}, \text{ где } Branch(\gamma) = \{Count(\gamma, i) | 1 \leq i \leq n_\gamma\}$$

и множеством **Bitmap** - множеством векторов связи:

$$Bitmap = \{Bitmap(\gamma) | 1 \leq \gamma \leq \Gamma\}, \text{ где } Bitmap(\gamma) = \{bitmap(\gamma, i) | 1 \leq i \leq n_\gamma\}.$$

Блочно-иерархическая сеть $G \in Branch$ однозначно задается множествами $Branch$ и $Bitmap$. Поддерево, соответствующее кластеру, будем обозначать аналогично кластеру как $M_\gamma^{(i)}$. Для иллюстрации на Рис.1. дана сеть G и соответствующее дерево связи, где

$$Branch = \{\{3, 4, 2\}, \{3\}\}, Bitmap = \{\{<011>, <100110>, <1>\}, \{<100>\}\},$$

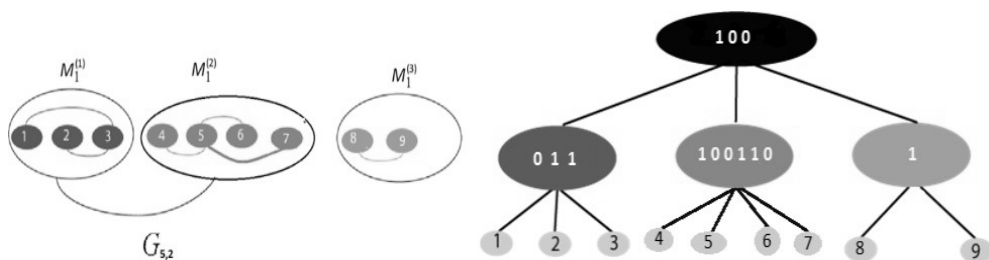


Рис.1. Дерево связи сети $G \in R_{Branch}$

3. Алгоритмы генерации нерегулярных блочно-иерархических сетей.

Генерация сети $G \in Branch$ представляет собой генерацию соответствующего дерева связи, т.е. генерацию структуры разбиения узлов на кластеры.

$$Branch = \{Branch(\gamma) | 1 \leq \gamma \leq \Gamma\}, \text{ где } Branch(\gamma) = \{Count(\gamma, i) | 1 \leq i \leq n_\gamma\},$$

и генерацию множества векторов связи

$$Bitmap = \{Bitmap(\gamma) | 1 \leq \gamma \leq \Gamma\}, \text{ где } Bitmap(\gamma) = \{bitmap(\gamma, i) | 1 \leq i \leq n_\gamma\},$$

Генерирование **Branch** возможно при задании максимального индекса ветвления ρ , либо числа элементов сети N , либо числа уровней Γ . Ниже описан алгоритм для обоих случаев.

Для генерирования вектора связи $bitmap(\gamma, i)$ определяется вероятность соединения $\omega = k^{-\mu}$, $k = |V(M_\gamma^{(i)})|$, $\mu > 0$. Параметр μ задает плотность сгенерированной сети, а k – число узлов в кластере $M_\gamma^{(i)}$.

3.1. Генерация структуры разбиения на кластеры при задании максимального индекса ветвления Γ и количества узлов N .

Генерирование структуры разбиения на кластеры *Branch* осуществляется по уровням снизу вверх, т.е. от листьев к корню дерева. Конструируем кластеры уровня γ , затем случайно и равномерно объединяем некоторые кластеры уровня γ в кластеры уровня $\gamma + 1$. Число уровней Γ , $\frac{N}{p} \leq \Gamma < \infty$ нерегулярной блочно-иерархической сети определяется в процессе генерации сети.

Вход: N, p

Выход: Γ - уровень сконструированного дерева, *Branch* - структура разбиения на кластеры.

1. $Branch := \emptyset$, $n := N$, $\gamma := 0$
2. Если $n = 1$, то $\Gamma := \gamma$ и завершить алгоритм
3. $\gamma := \gamma + 1, i := 1$
4. Сгенерировать случайное целое число l от 1 до p
5. Если $l > n$, то $l := n$
6. $Count(\gamma, i) := l, n := n - l, Branch(\gamma) := Branch(\gamma) \cup \{l\}, i := i + 1$
7. Повторить шаги 4-6 до тех пор, пока $n \neq 0$
8. $n := |Branch(\gamma)|$, $Branch := Branch \cup \{Branch(\gamma)\}$, возврат к шагу 2.

3.2. Генерация структуры разбиения на кластеры по заданному p и числу иерархических уровней Γ .

Генерация проводится по уровням иерархии сверху вниз, т.е. вначале генерируется корень дерева, а в конце листья дерева, которым соответствуют узлы сети. Число узлов в нерегулярной блочно-иерархической сети определяется в процессе генерации сети.

Вход: p, Γ

Выход: N -число узлов сети, *Branch*- структура разбиения на кластеры.

1. $\gamma := \Gamma, Branch := \emptyset, n := 1, i := 1, m := 0$
2. Если $\gamma = 0$, то завершить алгоритм с выходом $N := n$

3. Сгенерировать случайное целое число l от 1 до p
4. $Count(\gamma, l) := l, Branch(\gamma) := Branch(\gamma) \cup \{l\}$
 $l := l + 1, m := m + l$
5. Повторить шаги 3–4 n раз
6. $n := m,$
 $Branch := \{Branch(\gamma)\} \cup Branch, \gamma := \gamma - 1, l := 1, m := 0$
7. Возврат к шагу 2.

3.3. Генерация множества векторов связи.

Генерация множества векторов связи *Bitmap* осуществляется по построенному ветвлению дерева *Branch*.

Вход: $\mu > 0, \Gamma, Branch$

Выход: *Bitmap* – множество векторов связи.

1. $Bitmap := \emptyset, \gamma := 0$
2. Если $\gamma = \Gamma$, то завершить алгоритм
3. $l := 1, \gamma := \gamma + 1$
4. Определить $k := |V(M_\gamma^{(l)})|$ – число узлов в кластере $M_\gamma^{(l)}$
5. Сгенерировать битовую последовательность $bitmap(\gamma, l)$ длиной $l = (l - 1)/2$, где $l = Count(\gamma, l)$. При генерации используется вероятность соединения $\omega := k^{-\mu}$
6. $Bitmap(\gamma) = Bitmap(\gamma) \cup \{bitmap(\gamma, l)\}, l := l + 1$
7. Повторить шаги 5–6 n раз
8. $Bitmap := Bitmap \cup \{Bitmap(\gamma)\}$
9. Возврат к шагу 2.

Оценим число уровней сгенерированной сети. Среднее значение случайной величины $Count(\gamma, l)$ равно $(p + 1)/2$, из чего следует, что при использовании алгоритма генерации 3.1. среднее значение числа уровней сети $\Gamma_{aver} = \log_{(p+1)/2} N$. Именно эта оценка используется при оценках сложности алгоритмов вычисления основных свойств нерегулярной блочно-иерархической сети.

4. Алгоритмы вычисления основных свойств нерегулярной блочно-иерархической сети.

Структура хранения блочно-иерархической сети задается деревом связи, и генерация случайной сети G с N узлами сводится к генерации множеств *Branch* и *Bitmap*. Все разрабатываемые алгоритмы используют данную структуру хранения. Вычисление характеристик сети осуществляется по дереву связи, что дает большую эффективность как

по использованию памяти, так и по времени счета. В данной главе описаны алгоритмы вычисления степени узла сети, расстояния между двумя узлами сети, числа связей сети, числа связных подграфов заданной длины, числа циклов длины 3, числа циклов длины 4. Для сравнения с классическими алгоритмами приведены их сложностные оценки.

Введем определения, аналогичные введенным в [3]. Через $S(M_\gamma^{(i)}), 1 \leq \gamma \leq \Gamma$ – обозначим множество кластеров уровня $\gamma - 1$, вложенных в кластер $M_\gamma^{(i)}$.

$$S(M_\gamma^{(i)}) = \{S_1(M_\gamma^{(i)}), S_2(M_\gamma^{(i)}), \dots, S_k(M_\gamma^{(i)})\}, k = \text{Count}(\gamma, i), 1 \leq i \leq n_\gamma,$$

где $S_n(M_\gamma^{(i)}), 1 \leq n \leq k$ - n -ый вложенный кластер. Определим функцию $\psi_{\gamma,i}(n, s)$ непосредственной соединенности двух вложенных кластеров $S_n(M_\gamma^{(i)}), S_s(M_\gamma^{(i)})$ следующим образом:

$$\psi_{\gamma,i}(n, s) = \begin{cases} 1, & \text{если кластеры } S_n(M_\gamma^{(i)}) \text{ и } S_s(M_\gamma^{(i)}) \text{ непосредственно соединены} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Вложенные кластеры $S_n(M_\gamma^{(i)})$ и $S_s(M_\gamma^{(i)})$ непосредственно соединены, если в векторе связи $\text{bitmap}(\gamma, i)$ бит, описывающий связь между этими кластерами, равен 1.

4.1. Вычисление степени узла нерегулярной блочно-иерархической сети.

Пусть $G \in \text{Branch}$ блочно-иерархическая сеть, $x \in V(G)$. Рассмотрим множество кластеров уровня $\gamma \{M_\gamma^{(1)}, M_\gamma^{(2)}, \dots, M_\gamma^{(n_\gamma)}\}$. Пусть функция $v(x, \gamma)$ определяет номер кластера уровня γ содержащего узел x . В этом случае $M_\gamma^{(v(x, \gamma))}$ является единственным кластером уровня γ , содержащим узел x . Далее для удобства обозначим его $M_\gamma^{(x)}$.

Утверждение 1. Пусть $M_\gamma^{(x)}$ кластер уровня γ , тогда

$$\text{degree}(x, M_\gamma^{(x)}) = \sum_{i=1}^{\gamma} \sum_{j=1}^{\text{Count}(i, v(x, i))} (\psi_{i, v(x, i)}(v(x, i-1), j) * |V(S_j(M_i^{(v(x, i))}))|)$$

где $\text{degree}(x, M_\gamma^{(x)})$ – степень узла x в кластере $M_\gamma^{(x)}, 1 \leq i \leq \gamma$.

Доказательство. Для вычисления степени узла кластера $M_\gamma^{(x)}$ достаточно посмотреть путь от листа x к вершине $t_\gamma^{(n)}$ на дереве связи и

на каждом уровне i , $1 \leq i \leq \gamma$, подсчитать число непосредственных соединений кластера $M_{i-1}^{(x)}$ по вектору связи. Утверждение 1 доказано.

Для сети G будем иметь: $degree(x, G) = degree(x, M_{\gamma}^{(1)})$

Оценим сложность алгоритма. Для вычисления $|V(S_j(M_{i-1}^{(x,0)}))|$ необходимо сделать обход по всем вершинам дерева связи соответствующего кластера $M_{i-1}^{(x)}$ ненулевого уровня. Максимальное число вершин p -арного дерева, которые не являются листьями, равно $\sum_{k=0}^{i-1} p^k$. Для вычисления $degree(x, G)$ нужно выполнить $\sum_{i=1}^{\gamma} ((p-1) * \sum_{k=0}^{i-1} p^k)$ шагов. Индекс ветвления p является константой и определяется перед вычислением. При $\Gamma_{over} = \lceil \log_{(p+1)/2} N \rceil$ временная сложность алгоритма равна $O(N)$. При стандартном представлении сетей сложность алгоритма составит $O(N)$.

4.2. Расстояние между двумя узлами.

Утверждение 2. Пусть $d(x, y)$ расстояние между двумя связанными вершинами сети. Тогда $d(x, y) \in \{1, 2\}$, если $p=2$ и $d(x, y) \in \{1, 2, \dots, p-1\}$, если $p \geq 3$.

Доказательство аналогично регулярному случаю [3].

Оценим сложность алгоритма. Как и в регулярном случае, достаточно лишь подняться по дереву связности от листьев соответствующих узлов до вершины дерева соответствующего кластеру меньшего уровня, которая содержит данные узлы. При $\Gamma_{over} = \lceil \log_{(p+1)/2} N \rceil$ временная сложность алгоритма равна $O(\log N)$. При стандартном представлении сети временная сложность $O(N^2)$ (алгоритм Дейкстры).

4.3. Число связей в нерегулярной блочно-иерархической сети.

Утверждение 3. Пусть $G \in \text{Branch}, E(M_{\gamma}^{(n)})$ – множество связей кластера $M_{\gamma}^{(n)}$, $1 \leq n \leq n_{\gamma}$, тогда

$$|E(M_{\gamma}^{(n)})| = \sum_{k=1}^c |E(S_k(M_{\gamma}^{(n)}))| + \sum_{i=1}^{c-1} \left(\sum_{j=i+1}^c (\psi_{\gamma, n}(i, j) * |V(S_i(M_{\gamma}^{(n)}))| * |V(S_j(M_{\gamma}^{(n)}))|) \right),$$

где $c = \text{Count}(\gamma, n)$, $E(M_0^{(i)}) =$, $1 \leq i \leq N$.

Для сети G будем иметь $|E(G)| = |E(M_{\gamma}^{(1)})|$.

Оценим сложность алгоритма. Прежде всего, отметим, что для вычисления количества вершин нужного кластера необязательно делать обход по всем вершинам дерева связи соответствующего кластера, необходимо лишь суммировать количество вершин дочерних класте-

ров, которые уже подсчитаны во время алгоритма $|V(M_\gamma^{(n)})| = \sum_{k=1}^c |V(S_k(M_\gamma^{(n)}))|$. Из этого следует, что для подсчета второго слагаемого необходимо максимум p^2 шагов. Время работы алгоритма вычисления $|E(M_\gamma^{(n)})|$ удовлетворяет следующему рекуррентному соотношению:

$$\begin{cases} F(\gamma) = p * F(\gamma - 1) + p^2, \gamma > 0 \\ F(\gamma) = 0, \gamma = 0, \end{cases}$$

где через $F(\gamma)$, обозначена сложность $|E(M_\gamma^{(n)})|$, $1 \leq n \leq n_\gamma$. Решив его получаем $F(\gamma) = p^2 * (p^\gamma - 1)/(p - 1)$. Для уровня $\gamma = \Gamma$ имеем $O(p^2 * (p^\Gamma - 1)/(p - 1))$. При $\Gamma_{cover} = \lceil \log_{(p+1)/2} N \rceil$ временная сложность алгоритма равна $O(N)$. При стандартном представлении сетей сложность алгоритма равна $O(N^2)$.

4.4. Число циклов длиной 3 в нерегулярной блочно-иерархической сети.

Утверждение 4. Пусть $G \in \text{branch}$ и $Cycles(M_\gamma^{(n)}, 3)$ число циклов длиной 3 между узлами кластера $M_\gamma^{(n)}$, тогда

$$\begin{aligned} Cycles(M_\gamma^{(n)}, 3) &= \sum_{i=1}^c Cycles(S_i(M_\gamma^{(n)}), 3) + \\ &\sum_{\substack{i,j=1 \dots c \\ i \neq j}} \left(\psi_{\gamma,n}(i,j) * \left| E(S_i(M_\gamma^{(n)})) \right| * |V(S_j(M_\gamma^{(n)}))| \right) + \\ &\sum_{i=1}^{c-2} \sum_{j=i+1}^{c-1} \sum_{k=j+1}^c \left(\psi_{\gamma,n}(i,j) * \psi_{\gamma,n}(j,k) * \psi_{\gamma,n}(k,i) * |V(S_i(M_\gamma^{(n)}))| * |V(S_j(M_\gamma^{(n)}))| * |V(S_k(M_\gamma^{(n)}))| \right) \end{aligned}$$

где $c = \text{Count}(\gamma, n)$, $Cycles(M_0^{(1)}, 3) = 0$, $1 \leq l \leq N$,

Для сети G будем иметь: $Cycles(G, 3) = Cycles(M_\Gamma^{(1)}, 3)$.

Оценим сложность алгоритма. Время работы алгоритма вычисления $Cycles(M_\gamma^{(n)}, 3)$ удовлетворяет следующему рекуррентному соотношению:

$$\begin{cases} F(\gamma) = p * F(\gamma - 1) + p^3 + p^2, \gamma > 0 \\ F(\gamma) = 0, \gamma = 0, \end{cases}$$

где через $F(\gamma)$ обозначена сложность $Cycles(M_\gamma^{(n)}, 3)$, $1 \leq n \leq n_\gamma$. Решив его получаем $F(\gamma) = p^2 * (p + 1) * (p^\gamma - 1)/(p - 1)$. При

$\Gamma_{cover} = \lceil \log_{(p+1)/2} N \rceil$ временная сложность алгоритма равна $O(N)$. При стандартном представлении сетей сложность алгоритма $O(N^3)$.

4.5. Число различных циклов длины 3, проходящих через один и тот же узел.

Обозначим через $Cycles_x(M_\gamma^{(x)}, 3)$ число различных циклов длины 3, проходящих через один и тот же узел x в кластере $M_\gamma^{(x)}$

Утверждение 5. Пусть $G \in \mathbf{Branch}$ блочно-иерархическая сеть, тогда

$$Cycles_x(M_\gamma^{(x)}, 3) = Cycles_x(M_{\gamma-1}^{(x)}, 3) + \sum_{i=1}^c \left(\psi_{\gamma, \nu(x, \gamma)}(\nu(x, \gamma-1), j) * |E(S_j(M_\gamma^{(x)}))| \right) +$$

$$\sum_{j=1}^c \left(\psi_{\gamma, \nu(x, \gamma)}(\nu(x, \gamma-1), j) * degree(M_{\gamma-1}^{(x)}, x) * |V(S_j(M_\gamma^{(x)}))| \right) +$$

$$\sum_{i=1}^{c-1} \sum_{j=i+1}^c \left(\psi_{\gamma, \nu(x, \gamma)}(\nu(x, \gamma-1), i) * \psi_{\gamma, \nu(x, \gamma)}(i, j) * \psi_{\gamma, \nu(x, \gamma)}(j, \nu(x, \gamma-1)) * |V(S_i(M_\gamma^{(x)}))| * |V(S_j(M_\gamma^{(x)}))| \right)$$

Оценим сложность алгоритма. Как и в предыдущих случаях можно вычислить число циклов длины 3, проходящих через один и тот же узел в кластере сети, обходя дерево связности один раз. При $\Gamma_{cover} = \lceil \log_{(p+1)/2} N \rceil$ временная сложность алгоритма равна $O(N)$. При стандартном представлении сетей сложность алгоритма равна $O(N^2)$.

4.6. Число циклов длиной 4 в нерегулярной блочно-иерархической сети. Аналогично утверждению 3 разработан алгоритм вычисления числа циклов длины 4 в нерегулярной блочно-иерархической сети. При $\Gamma = \lceil \log_{(p+1)/2} N \rceil$ временная сложность алгоритма равна $O(N)$. При стандартном представлении сетей сложность алгоритма равна $O(N^4)$.

Результаты эксперимента. Данные алгоритмы были апробированы в разрабатываемой системе “Random Networks Explorer”. Ниже приводятся результаты 2-х экспериментов:

1. Вычисление циклов длины 3 и циклов длины 4 для регулярной и нерегулярной блочно-иерархической сети. (Таблица 1).
2. Графики распределений степеней узлов для регулярной и нерегулярной блочно-иерархической сети (Рис. 2).

Результаты получены на ансамбле из 100 экземпляров, для сетей с параметром ветвления $p = 3$ и числом вершин $N = 3^p = 19683$.

Таблица 1.

Сравнение циклов длины 3 и 4 для регулярной и нерегулярной блочно-иерархической сети с параметрами $p = 3$, $N = 19683$ на ансамбле из 100 экземпляров.

N	p	μ	Циклы длиной 3		Циклы длиной 4	
			Регулярная сеть	Нерегулярная сеть	Регулярная сеть	Нерегулярная сеть
19683	3	0.1	$\approx 2 \cdot 10^{11}$	$\approx 2.5 \cdot 10^{11}$	$\approx 2 \cdot 10^{12}$	$\approx 2.3 \cdot 10^{12}$
19683	3	0.3	$\approx 2.5 \cdot 10^9$	$\approx 5 \cdot 10^9$	$\approx 1.2 \cdot 10^{14}$	$\approx 6 \cdot 10^{13}$
19683	3	0.5	$\approx 8 \cdot 10^7$	$\approx 2.5 \cdot 10^8$	$\approx 2 \cdot 10^{13}$	$\approx 3.5 \cdot 10^{12}$
19683	3	0.8	$\approx 4 \cdot 10^5$	$\approx 10^7$	$\approx 4 \cdot 10^9$	$\approx 4 \cdot 10^{10}$

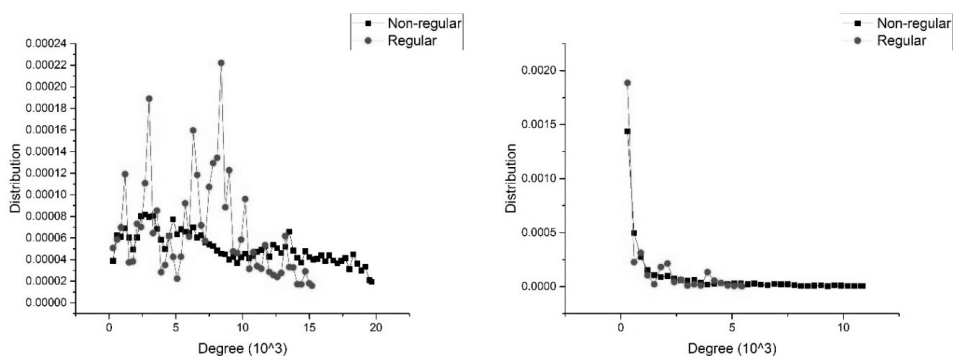


Рис.2. Сравнение распределений степеней для нерегулярных (круг) и регулярных (квадрат) сетей с параметрами: $N = 19683$, $p = 3$, $\mu = 0.1$ (справа), $\mu = 0.3$ (слева) на ансамбле из 100 экземпляров.

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] Аветисов В.А., Биколов А.Х., Васильев О.А., Нечаев С. К., Чертович А.В. О некоторых физических приложениях случайных иерархических матриц. ЖЭТФ 136 (3) 566 (2009); V. A. Avetisov, A. Kh.

- Bikulov, O. A. Vasilyev, S. K. Nechev, and A. V. Chertovich*, JETP, 109 (3) 485 (2009)).
- [2.] *Albert R, Barab'asi A-L* Statistical mechanics of complex networks. Rev. Mod. Phys. 74: 47–97. (2002).
- [3.] *Аветисян С., Арутюнян А., Асланян Д., Карапетян М., Кочарян. А.* Алгоритмы вычислений статистических свойств регулярных блочно-иерархических сетей. Шестая Годичная научная конференция (5–9 декабря 2011г.): Сборник научных статей: Ер.: Изд-во РАУ, 2012. 312 с.
- [4.] *S. Avetisyan, A.Kocharyan.* The System of Generation of Random Networks and Computation of Their Topological Properties. 9-th International Conference of Computer Science and Information Technologies (CSIT-2013), Yerevan 2013, PP. 381–384.

АЛГОРИТМ ВЕКТОРИЗАЦИИ КОНТУРОВ

Т.Б. Айрапетян

tigran.human@gmail.com

Аннотация

В статье рассмотрен алгоритм векторизации контуров, основанный на их итеративной модификации. Итерации производятся до тех пор, пока остаются векторизированные отрезки, длина которых меньше некоторого наперед заданного шага векторизации. Алгоритм завершается, когда все отрезки оказываются длиннее шага векторизации. Произведено сравнение с другими алгоритмами, и дана оценка сложности рассматриваемого алгоритма. Областью применения алгоритма могут быть пакеты графических редакторов (векторно-растровые) и различные геоинформационные системы (ГИС).

Ключевые слова: векторизация, контур, алгоритм, итерация.

ՇՂԹԱՆԵՐԻ ՎԵԿՏՈՐԱՅՄԱՆ ԱԼԳՈՐԻԹՄ

Տ.Բ. Հայրապետյան

Ամփոփում

Հոդվածը դիտարկում է շղթաների վեկտորացման ալգորիթմ՝ հիմնված իրենց կրկնվող /իտերատիվ/ փոփոխության վրա: Այդ կրկնությունները /իտերացիան/ կատարվում են, քանի դեռ կան վեկտորացված հատվածներ, որոնց երկարությունը քիչ է ինչ-որ նախօրոք տրված վեկտորի քայլից: Ալգորիթմը ավարտվում է, երբ բոլոր հատվածներն ավելի երկար են, քան վեկտորի քայլը: Համեմատություն է անցկացվում այլ ալգորիթմերի հետ, և գնահատվում է դիտարկվող ալգորիթմի բարդությունը: Ալգորիթմի կիրառման շրջանակը կարող է լինել գրաֆիկական խմբագիրների փաթեթներ (վեկտորա-պատկերացանցային) և մի շարք աշխարհագրական տեղեկատվական համակարգեր (GIS):

Հիմնաբառեր՝ վեկտորացում, հանգույց, ալգորիթմ, բազմակրկնություն /իտերացիա/:

THE ALGORITHM OF LOOPS VECTORIZATION

T. Hairapetyan

Summary

The article considers the algorithm of loops vectorization based on their iterative modification. The iterations are made as long as there are vectorized segments, the length of which is less than some pre-assigned step of the vectorization. The algorithm ends when all the segments are longer than the vectorization step. Comparison with other algorithms is given, and the complexity of the algorithm is evaluated. The field of application of the algorithm can be packets of graphic editors (vector and raster), and a variety of geographic information systems (GIS).

Keywords: vectorization, loop, algorithm, iteration.

Введение

Векторизация растровых изображений используется как для преобразования входных данных в векторную графику, так и для выявления некоторых характеристик изображений. Эти характеристики могут быть использованы в дальнейшем для сопоставления изображений, для более ресурсосберегающего хранения и многих иных целей. В данной работе рассматривается алгоритм векторизации растровых изображений, содержащих лишь контуры шириной 1 пиксел. Очевидно, любой более широкий контур может быть легко преобразован либо в два контура единичной ширины, проходящих по границам исходного контура, либо в один контур единичной ширины, проходящий по центру исходного контура.

Описание алгоритма

Определение 1: Два пиксела называются смежными, если они имеют либо общую грань, либо общий угол.

Определение 2: Замкнутым контуром назовем множество таких пикселов, каждый из которых имеет ровно два смежных пиксела из этого же множества.

Определение 3: Незамкнутым контуром назовем последовательность таких пикселов, каждый из которых, за исключением первого и последнего, смежен только с предыдущим и следующим пикселом. Первый же пиксел смежен лишь со вторым, а последний – лишь с пред-

последним. При этом, первый пиксел есть начало незамкнутого контура, а последний – его конец.

Определение 4: Контурным изображением назовем пикселное изображение, содержащее лишь непересекающиеся контуры, т. е. такие контуры, где любой пиксел каждого контура не является смежным для любого пиксела остальных контуров.

Определение 5: Векторизованным замкнутым контуром по длине δ будем называть последовательность точек $p_i = (x_i, y_i), i \in [1, n]$ таких, что $|p_{i+1} - p_i| \leq \delta$ для $i \in [1, n-1]$, и также $|p_n - p_1| \leq \delta$.

Определение 6: Векторизованным незамкнутым контуром по длине δ будем называть последовательность точек $p_i = (x_i, y_i), i \in [1, n]$ таких, что $|p_{i+1} - p_i| \leq \delta$ для $i \in [1, n-1]$.

Определение 7: Векторизованным изображением назовем множество векторизованных контуров.

Определение 8: Отрезком замкнутого векторизованного контура $p_i = (x_i, y_i), i \in [1, n]$ назовем (p_i, p_{i+1}) для $i \in [1, n-1]$, либо отрезок (p_n, p_1) .

Определение 9: Отрезком незамкнутого векторизованного контура $p_i = (x_i, y_i), i \in [1, n]$ назовем (p_i, p_{i+1}) для $i \in [1, n-1]$.

На вход алгоритма подается контурное изображение и шаг векторизации δ . На выходе получается векторизованное изображение δ того же размера. Каждый контур входного изображения векторизируется отдельно.

Контур заменяется векторизованным контуром по шагу δ в два этапа: на первом этапе контур заменяется на векторизованный контур по шагу 1, а на втором этапе векторизованный контур по шагу 1 постепенно преобразуется в векторизованный контур по шагу δ .

Работа первого этапа очевидна: каждый пиксел контура заменяется на точку векторизованного контура с теми же координатами. И так как входной контур состоял из смежных пикселов, то расстояние между соседними точками векторизованного контура будет либо 1, либо $\sqrt{2}$. Т. е. уже получится векторизованный контур по шагу 1. На Рис. 1 приведена иллюстрация работы первого этапа векторизации контура.

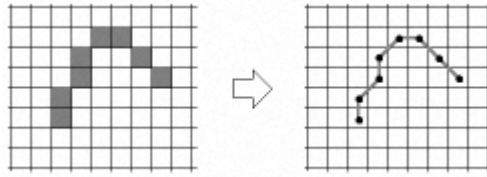


Рис. 1 Замена пикселей входного контура последовательностью их координат

Второй этап векторизации контура представляет собой цикл, в ходе каждого шага которого количество точек векторизованного контура уменьшается на 1 до тех пор, пока контур не станет векторизованным по длине δ . А именно, для векторизованного по шагу 1 незамкнутого контура $p_i = (x_i, y_i), i \in [1, n]$ преобразование к векторизованному по шагу δ незамкнутому контуру производится по циклу со следующими действиями:

а) если $\exists i, i \in [2, n-1]$ так, что $|p_{i+1} - p_i| \leq \delta$ и $(p_i - p_{i+1}) < \delta$, то выбирается тот индекс i , для которого отрезки $(p_{i-1} - p_i)$ и $(p_i - p_{i+1})$ составляют наибольший угол, и точка p_i исключается из векторизованного контура;

б) иначе, если $\exists i, i \in [2, n-1]$ так, что $(p_i - p_{i+1}) < \delta$ и $(p_{i+1} - p_{i+2}) \geq \delta$, либо $(p_{i-1} - p_i) \geq \delta$ и $(p_i - p_{i+1}) < \delta$, то очевидно, что, соответственно, $(p_{i-1} - p_i) \geq \delta$ либо $(p_{i+1} - p_{i+2}) \geq \delta$, и в ходе шага цикла точки p_i и p_{i+1} исключаются, вместо которых вставляется точка $q = \frac{p_i + p_{i+1}}{2}$;

в) иначе получается, что для $\forall i, i \in [1, n-1], (p_i - p_{i+1}) \geq \delta$, что свидетельствует о том, что получился векторизованный незамкнутый контур по шагу δ .

Для замкнутых контуров второй этап векторизации идентичен первому, с условием, что индексы нужно брать по модулю n , т.е. подразумевать что $p_0 = p_n$ и $p_{n+1} = p_1$.

Пример работы алгоритма

Рассмотрим работу алгоритма на вышеприведенном примере растрового изображения. Возьмем $\delta = 2$. Все отрезки векторизованного контура по шагу 1 меньше δ , следовательно, первый шаг цикла второ-

го этапа пройдет по пункту **а**. А именно: 6-й и 7-й отрезки составляют наибольший угол – 180° , следовательно, они заменятся одним отрезком (Рис. 2 а). Далее, опять по пункту **а** объединению подлежат 1-й и 2-й отрезки с углом 135° (рис 2 б). На следующем шаге цикла, аналогично предыдущему шагу, объединятся 2-й и 3-е отрезки (рис 2 в). На данном этапе имеем 4 отрезка, 3-й короче δ , остальные длиннее δ . Следовательно, уже в шаге цикла применяем пункт **б**, и 3-й отрезок исключается, а 2-й и 4-й соединяются в его серединной точке. Однако, так как длина 3-го отрезка была равна 1, то за серединную точку выбираем одну из концевых точек (рис 2 г).

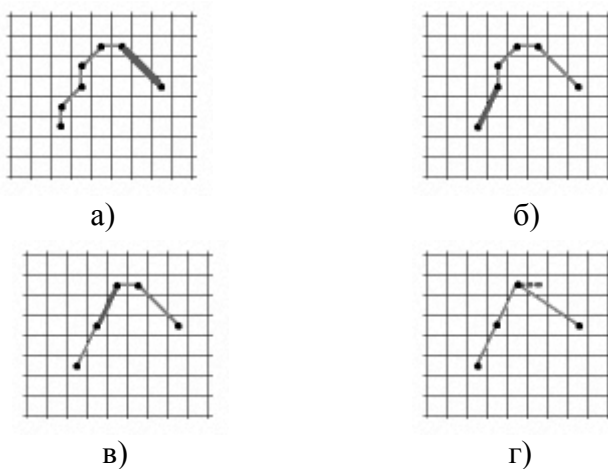


Рис. 2 Иллюстрация работы алгоритма.

После этого работа алгоритма завершена, так как все получившиеся 3 отрезка длиннее δ .

На Рис. 3 приведен результат ещё одного сравнения входного контура и векторизованного контура по шагу $\delta = 2$:

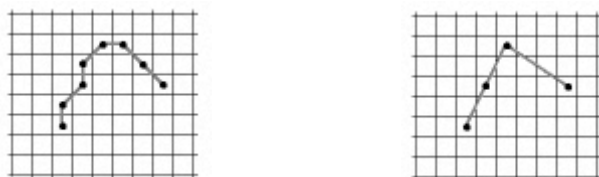


Рис. 3. Сравнение первоначального и векторизованного контуров.

Сравнение с другими алгоритмами

Ниже представлено сравнение работы данного алгоритма с алгоритмом [1], на тех же входных данных. Даны два примера:

Изображение 1: Сравнение работы рассматриваемого алгоритма и алгоритма [1] на входном изображении «1»:

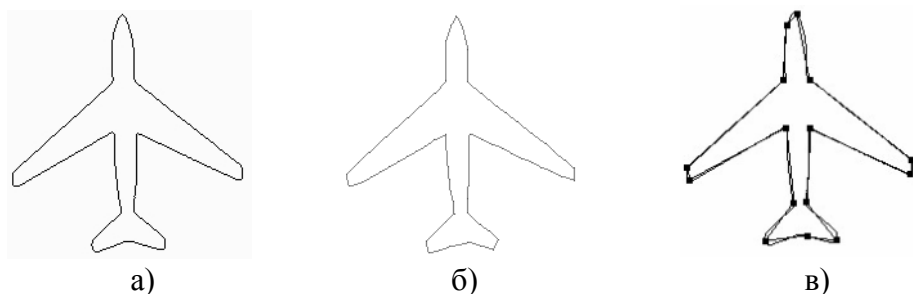


Рис. 4. Сравнение работы алгоритма с [1]: а) исходный контур; б) векторизированный контур с шагом $\delta = 8$; в) векторизированный контур по алгоритму [1].

Изображение 2: Сравнение работы рассматриваемого алгоритма при разных значениях δ и алгоритма [1] на входном изображении «2»:

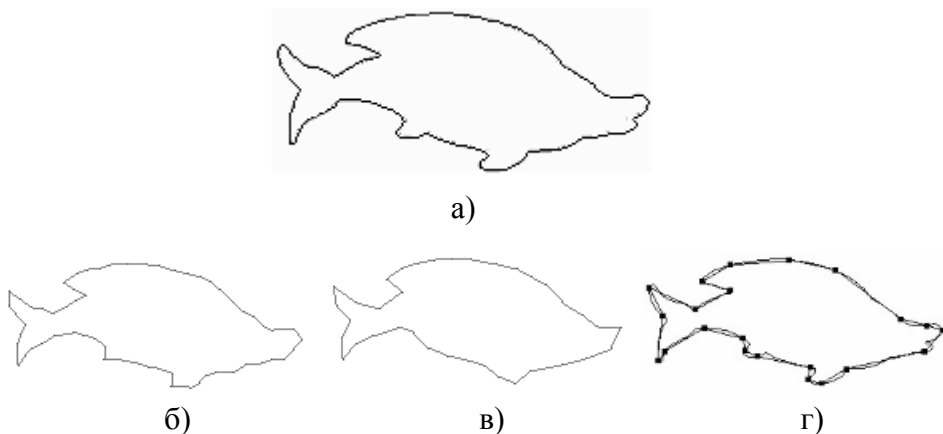


Рис. 5. Сравнение работы алгоритма с [1]: а) исходный контур; б) векторизированный контур с шагом $\delta = 6$; в) векторизированный контур с шагом $\delta = 10$; г) векторизированный контур по алгоритму [1].

Сложность работы алгоритма

При простой реализации алгоритма количество действий для выявления индекса i , для шагов а) и б) будет пропорционально $O(n)$,

где n – количество пикселей исходного контура. Следовательно, общее время работы алгоритма на одном контуре будет $O(n^2)$. Однако, если использовать более сложные структуры данных, такие как *куча* или *бинарное дерево поиска*, то время работы одного шага цикла будет сокращено до $O(\log n)$, следовательно, общее время работы на одном контуре составит $O(n \log n)$.

Заключение

Как видно из рассмотренных примеров и сравнений алгоритмов, данный алгоритм может, в зависимости от особенностей и неровностей входного контура, а также от заданного шага векторизации δ , векторизировать контуры, сохраняя большее количество их изначальных деталей. Для насыщенных контурами изображений, где количество пикселей всех контуров – N , сравнимо с количеством пикселей всего изображения, время работы алгоритма будет меньше или равно – $O(N \log N)$, в зависимости от количества контуров.

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] Peng-Yeng Yin. Polygonal Approximation of Digital Curves Using the State-of-the-art Metaheuristics.
- [2.] *Сташевский С.Ю.* Алгоритм векторизации растровых изображений в общем виде.
- [3.] *Dunham, J.G.* (1986). Optimum uniform piecewise linear approximation of planar curves, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 8, PP. 67–75.
- [4.] *Ray, B.K. & Ray, K.S.* (1993). Determination of optimal polygon from digital curve using L1 norm. Pattern Recognition, Vol. 26. PP. 505–509.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СМЫСЛА СЛОВА, ПРЕДЛОЖЕНИЯ И ТЕКСТА

(На примере восточно-армянского
литературного языка)

В.Г. Ваградян

Аннотация

В статье рассматриваются теоретические основы и практическая реализация решения задачи выявления смысла предложения и текста. Реализация осуществлена на примере восточно-армянского литературного языка. Дается определение понятия «*смысл предложения*». Вводится понятие «*смысл предложения 0-го и последующих уровней*». Вводится несколько постулатов.

Ключевые слова: семантический анализ текста, синтаксический разбор предложения, компьютерная лингвистика.

ԲԱՌԻ, ՆԱԽԱԳԱՍՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ՏԵՔՍՏԻ ԻՍԱՍՏԻ ԲԱՅԱՀԱՅՏՈՒՄ

Վ. Վահրադյան

Անփոփում

Հոդվածում դիտարկվում են նախադասության և տեքստի իմաստի բացահայտման խնդրի լուծման տեսական հիմքերը և գործնական իրականացումը: Վերջինս իրագործվել է արևելահայերեն գրական լեզվի օրինակի վրա: Տրվում է «*նախադասության իմաստ*» հասկացության սահմանումը: Ներկայացվում է «*նախադասության գրոյական և հաջորդող մակարդակների իմաստ*» հասկացությունը: Ներկայացվում են մի քանի պոստուլատ:

Հիմնաբառեր՝ տեքստի իմաստային վերլուծություն, նախադասության շարահյուսական վերլուծություն, համակարգչային լեզվաբանություն:

THE IDENTIFICATION OF THE MEANING OF A WORD, SENTENCE AND TEXT

V. Vahradyan

Summary

The article discusses the theoretical basis and practical implementation of the solution to the problem of the meaning detection of a sentence and a text. The implementation is carried out via the example of the Eastern Armenian language. The definition of the “*meaning of the sentence*” concept is given. The concept of “*sentence meaning of the 0-th and subsequent levels*” is introduced. Several postulates are introduced as well.

Keywords: semantic analysis of text, sentence parsing, computational linguistics.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема семантического анализа текста все еще остается одной из центральных нерешенных задач искусственного интеллекта. Решить эту задачу пытались многие исследовательские группы. Применялись самые разные подходы. Однако, «Воз поныне там». В самое последнее время – в конце 2014г., компания АBBYU презентовала программный продукт, претендующий на семантический перевод. Пока нам этот продукт не известен.

В данной работе мы пытаемся представить наши разработки, подходы и мысли в указанном направлении искусственного интеллекта. В первую очередь, мы поставили вопросы: «А достаточно ясно мы представляем задачу»? «А достаточно ли четко мы представляем себе смысл слова “смысл”»?

Выяснилось, что это кардинальные вопросы, от ответа на которые зависит правильное направление дальнейших рассуждений. И так, мы принимаем следующее понимание смысла слова «смысл»:

Определение: Смысл слова «смысл» выражается двумя понятиями:

1. Значение;
2. Цель.
 - 2.1. Выгода;
 - 2.2. Резон.

Надо сказать, что мы не одиноки, не оригинальны в своем подходе к пониманию смысла этого слова¹. Но, насколько нам известно, практического применения в семантическом анализе текста вторая ипостась смысла – цель, никогда не находила.

Поскольку существует мнение, что шахматы являются «мухой дрозофилой» искусственного интеллекта, то сначала нами было проведено модельное исследование, рассмотрение шахматной нотации как текст, и предпринята попытка выявить смысл такого текста.

ШАХМАТНАЯ НОТАЦИЯ КАК ТЕКСТ

В шахматной нотации полуход² является полным аналогом предложения обычного текста, поскольку полуход можно прочитать, и в нем присутствуют главные члены предложения – сказуемое, подлежащее, а также дополнения. Поэтому к нему можно применить традиционные этапы анализа текста (в данном случае – предложения):

1. Лексический анализ предложения (= полухода).
2. Синтаксический анализ предложения (= полухода).
3. Семантический анализ предложения (= полухода).
 - 3.1. Определение (выявление) смысла полухода как *значение*.
 - 3.2. Определение (выявление) смысла полухода как *цель*.
 - 3.2.1. Определение (выявление) смысла – цели, полухода как проистекающее из смысла позиции.

Определение: Под *смыслом позиции* в шахматах понимают извлечение максимально возможной *выгоды* из данной позиции, иначе говоря, *смысл позиции это получение новой позиции (локальная цель), оценка которой будет максимально возможной* [2].

Пример: Приведем полный анализ полухода Kg1-f3.

- В результате лексического и синтаксического анализа предложения (= полухода) получаем следующую картину:

¹ Словарь Explanatory (RU-RU) дает следующее объяснение: 1. Внутреннее, логическое содержание (слова, речи, явления), постигаемое разумом; *значение*. 2. Разумное основание, *цель*. Преимущество, *выгода*, польза, толк, прок. (*Подчеркнуто нами*) [1].

БСЭ в статье «Смысл» в частности пишет: «В языкознании – иногда синоним значения, но обычно противопоставляется ему и может означать:

- совокупность внеязыковых характеристик содержания, в отличие от значения как обобщения его внутриязыковых характеристик,
- семантическую характеристику целого высказывания или текста, в отличие от значения (на уровне отдельного слова) [1].

² Под полуходом понимается ход, сделанный только одной стороной игры.

- К(*конь*) (подлежащее)
- - (*идет*) (сказуемое)
- g1 и f3 (дополнения сказуемого – обстоятельства места).

Но достаточен ли полученный результат для понимания смысла полухода с точки зрения шахматной игры?

Ответ очевиден – *нет!* Нет, потому что шахматная нотация является символично-словесным описанием событий, происходящих на шахматной доске. И для читателя шахматной нотации не менее (а, скорее, всего намного, более) важен ответ на вопрос: «С какой целью Конь с поля g1 был переставлен на поле f3?», чем сам факт констатации данного полухода. В ответе на этот вопрос и заключается истинный смысл данного шахматного предложения (= полухода). Ответ на этот вопрос не просто сильно зависит от конкретной позиции, в которой был сделан данный полуход, а определяется смыслом самой позиции и направлен на осуществление смысла (= цели) позиции.

Как следует из определения, смысл позиции весьма субъективен и зависит от личностных характеристик шахматиста – автора шахматной нотации (= текста), в первую очередь, от силы игры шахматиста.

Поэтому для нас результат синтаксического анализа есть начало определения *смысла нулевого уровня*. В случае анализа шахматной нотации можно эффективно ввести понятия *смысл первого, второго* и т.д. *уровней* в соответствии с глубиной анализа позиции в один, два и т.д. ходов. Для выявления смыслов полухода ненулевого уровня необходимо иметь – разработать, базу шахматных экспертных знаний, представленных так, как их воспринимает и ими оперирует человек-шахматист.

Определим смысл нулевого уровня рассматриваемого полухода (= предложения). Шахматная нотация производится на строго формализованном языке. Однако прочтение этого текста может быть до определенной степени произвольным, поскольку человек оперирует словами естественного языка, а последний весьма неоднозначен. Так, полуход Kg1-f3 может быть прочтен – озвучен, следующими способами: «*Конь с поля g1 идет (переставляется, переходит, перескакивает, становится, и так далее...) на поле f3*».

Перед нами различные значения символа (= шахматного слова) «-» русской (советской) шахматной нотации, каждое из которых привносит некоторую смысловую и/или эмоциональную тональность в осмысление данного полухода. Например, слово «*перескакивает*» отражает особенность хода этой шахматной фигуры проходить через препятствия на пути от начального поля до поля следования, а слово «*становится*» подчеркивает тот факт, что конь закрепляется на поле f3. Но дело в том, что ту или иную интерпретацию смысла полухода дает чи-

татель или комментатор рассматриваемой партии, а вопрос в том, чтобы определить смысл, который закладывал в это предложение (= полуход) автор текста (шахматной нотации). В этом вопросе в основе нашего подхода лежит наше понимание «*смысла предложения*».

Определение: Под *смыслом предложения* понимается некий *инвариант* при синонимическом перефразировании предложения.

Вопрос в том, как определить – выявить, этот *инвариант*?

Постулат: Главным членом предложения является сказуемое³.

Из приведенного постулата следует, что основную смысловую нагрузку нулевого уровня несет сказуемое предложения. И это наводит на мысль, что инвариантность должна быть связана с синонимами сказуемого.

Постулат: Инвариантом глагольных синонимов является наиболее абстрактное – обобщенное, представление действия выражаемого данными глаголами.

Обобщающим словом для приведенных синонимов является слово – *перемещается*⁴.

Итак, смысл нулевого уровня для полухода Kg1-f3 можно сформулировать следующим образом: «*Конь с поля g1 перемещается на поле f3*».

ТЕКСТ НА ЕСТЕСТВЕННОМ ЯЗЫКЕ

Тот же принцип заложен и в основе определения смысла предложения на естественном языке.

- Смысл слова определяется посредством лексического анализа в контексте синтаксиса.
- Смысл нулевого уровня предложения определяется синтаксическим анализом в контексте семантики.
- Смысл более высокого уровня предложения определяется локальным контекстом и его смыслом, то есть локальной целью, которую ставит перед собой автор текста в данном завершённом фрагменте текста.

СМЫСЛ СЛОВА

Текстом для нас служит цепочка символов, применяемых для записи в текстовом файле правильных выражений на восточно-армянском литературном языке.

³ Хотя мы и самостоятельно выдвинули этот постулат, однако, справедливости ради, надо сказать, что впервые его опубликовал французский лингвист Л. Теньер [3], ставший основоположником «грамматик зависимостей».

⁴ Возникает проблема: как автоматически получить и загрузить в базу знаний обобщающее слово для каждой группы синонимов?

Лексический анализ.

Определение: Под *словом* понимается подцепочка текста, ограниченная

- Слева одним из следующих символов:
 - пробел, дефис, символ начала строки, открывающаяся скобка, открывающаяся кавычка, косая черта;
- справа одним из следующих символов:
 - пробел, дефис, символ конца строки, закрывающаяся скобка, закрывающаяся кавычка, косая черта;
 - одним из знаков препинания армянского языка:
 - запятая, точка, двоеточие, многоточие,
 - одним из знаков произношения:
 - бут (“’”), вопросительный знак (“^o”) и пробел, знак удлинения (“’”) и пробел, шешт (“’”) и пробел;
 - из сочетания одного из последних трех знаков и любой буквы армянского алфавита опускается этот знак, и слово рассматривается без него.

Нами был разработан алгоритм выявления неопределенной формы слова, основанный на армянской морфологии. Он состоит из следующих пунктов:

- Выделение окончания слова
- Определение типа окончания
 - Глагольные окончания (например: «-ացի» в слове գնացի, «-եցրեց» в слове շտեգրեց и т.д.);
 - Именные окончания (например: «-ով» в словах «գլխարկով», «մեծով», «-ից» в слове «գրչափից» и т.д.);
 - Учет – специальная обработка, окончаний из пересечения этих двух множеств (например: «-ով» в слове «գնով»);
- Глагольные окончания заменяются соответствующими окончаниями неопределенных форм и полученное слово ищут в словаре (например: «-ացի» в слове «գնացի» заменяется на «-ալ» и получается «գնալ», «-եցրեց» в слове «շտեգրեց» – на «-եցնել» с получением слова «շտեցնել» и т.д.);
- Определение падежей именных частей речи
 - разрешение омонимных падежных ситуаций (например: падежи ուղղական/հայցական, սեռական/տրական);
- Определение параметров спряжения глаголов (лицо, время, число)
- Учет и разбор омонимов:
 - Омонимы «ես» (вспомогательный глагол в предложениях типа «Դու էս գնացել:» и личное местоимении в предложениях типа

«Ես եմ գնացել:»), «արի» (прилагательное «храбрый», спряженная форма глагола «գալ», междометие в выражении «Արի գնանք»);

- Омонимы с окончаниями «-ում», «-ու», «-ի» (գնում (в цене, покупка, спряженная форма глаголов «գնել» и «գնալ»), «գնալու» («գնալու եմ» и «գնալու համար»), արի» (склоненная форма существительного ար и спряженная форма глагола «արել»).
- Когда одно из значений омонима является глаголом, а другое – именной частью речи (например: «արի» как вдова и как спряженная форма: 3 лицо, ед. число, условного наклонения глагола «արել» – жечь, «սեխեր» – гвозди и спряженная форма глагола забивать гвоздь и т.д.) всегда удается разобрать на основе синтаксиса;
- В других случаях (например: «սկան» как «мышца» и как родительный падеж слова «սկ» – мышь) часто удается разобрать на основе синтаксиса;
- В третьих случаях (например: слово «մատ» как шахматный термин «мат» и как «палец») приходится прибегать к контексту.

В последнем случае с точки зрения лексики они не различимы.

Различия появляются при более высоких уровнях анализа.

- Учет фразеологизмов и устойчивых словосочетаний (например: «ցույց տալ», «գլխի ընկնել» и т.д.).
- Учет различного рода исключений, связанных с:
 - определением слов во множественном числе (например: «կանայք – կին», «փշեր – փուշ», «դներ – դուռ», «սվերներ – նվեր», «գարդեր – գարդ» и т.д.);
 - определением спряженных форм неправильных глаголов (например: «գալ», «տալ», «լալ» «եկավ – գալ», «տվեց – տալ», «մի լար – լար» и т.д.);
 - определением склоненных форм именных частей речи (например: «բռնց – բույր», «շան – շուն», «իմ – ես», «բարու – բարի» и т.д.);
- Определение слов, обозначающих должность человека.
- Определение слов, обозначающих имя и/или фамилию человека.
- Определение лексической принадлежности по словарю, что предполагает:
 - создание электронного словаря (автоматически);
 - привнесение знаний в словарь (автоматически).

СМЫСЛ (НУЛЕВОГО УРОВНЯ) ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Для проведения синтаксического анализа нами было принято важное и в общем случае очень трудновыполнимое решение: перед началом собственно синтаксического анализа разбить сложное предложение на составляющие простые. Это было сделано для того, чтобы существенно облегчить дальнейший синтаксический анализ. В основе его лежит учет того факта, что в каждом простом предложении может быть только одно сказуемое (явное или предполагаемое). Это сказуемое может быть простым или сложным, но количество таких сказуемых должно быть не больше одного.

Синтаксический анализ.

Итак, алгоритм синтаксического анализа состоит из следующих пунктов:

- разбивка сложных предложений на простые предложения:
 - сложносочиненные предложения разбиваются и располагаются в порядке следования простых предложений (например, «Արամն ընկալ ջուրը, կոշիկները թրջեց ու գնաց տուն:» и т.д.);
 - Сложноподчиненные предложения:
 - определение главного предложения (например: «Աշտուր, երե ջուրը չընկներ, դեռ կիսադար բախում:» и т.д.). Оно располагается на первом месте;
 - все подчиненные предложения располагаются в порядке следования.
- определение сказуемого каждого простого предложения на основе синтаксических и семантических знаний;
- определение сложного сочетания подлежащих (их количество может быть различным: от 0, 1 и больше, в зависимости от того, в каком числе находится сказуемое) каждого простого предложения.
 - Применение синтаксических знаний (согласование со сказуемым по лицу и по числу) о кандидатах в подлежащие (например: «Դասերից հետո երկարօրյայում աշակերտները (подлежащее) տնային աշխատանքն են սովորաբար կատարում: »).
 - Применение знаний (семантики) о кандидатах в подлежащие (например, «Քարն ընկալ ջուրը:»).
 - Определение перечислений – кандидатов в подлежащие.
 - Определение приоритетности среди подлежащих для согласования со сказуемым по лицу и числу.
 - Определение перечислений – кандидатов в прямые дополнения.
 - Определение перечислений в перечислении (например: «Այս տարվա ձմեռային ցրտաշունչ և ձնառատ օրերին էս, Արամը

և նրա բարձրահասակ, գեղեցիկ, շիկահեր հյուրը գնացել էինք Օսղկաձոր:»)

- Вставка опущенных (из эстетических соображений) членов (подлежащих и сказуемых) простых предложений, выделенных из сложных предложений.

Например: Сложносочиненное предложение «Արամն ընկալ ջուրը, կոշիկները թրջեց ու գնաց տուն:» разбивается на простые предложения, и вставляются предполагаемые подлежащие следующим образом: «Արամն ընկալ ջուրը:», «[Արամը] կոշիկները թրջեց:», «ու [Արամը] գնաց տուն:». А вот в предложении «Արամը գնաց տուն, իսկ մենք՝ թափրոն:» разбивается и дополняется следующим образом: «Արամը գնաց տուն:», «(իսկ մենք () [գնացինք] թափրոն:». При этом генерируется слово «գնացինք» из слова «գնալ» согласованием времени и числа вставленного сказуемого).

- Определение дополнений (определителей) подлежащего (подлежащих) на основе синтаксических и семантических знаний.
- Определение дополнений сказуемого: обстоятельства места, времени и т.д. на основе синтаксических и семантических знаний.

Семантический анализ.

Под семантическим анализом мы понимаем определение смысла предложения нулевого и последующих ненулевых уровней в контексте смысла всего текста или его локальной (в известной степени завершённой) части.

Как шахматная нотация отражает события на шахматной доске, так и текст на естественном языке отражает реальные или воображаемые события, происходящие в реальном или воображаемом мире. Поэтому для выявления смысла предложения ненулевого уровня необходимо иметь сведения о контексте, в котором происходят описываемые события и экспертные знания в соответствии с контекстом. Вопрос в том, *как определить контекст из самого текста, не имея априорной информации о тексте и как контекстные экспертные знания автоматически загрузить в компьютер?*

Наиболее близкой шахматной ситуацией к описанной задаче является нотация шахматных этюдов и задач, где вначале специальной нотацией задается рассматриваемая позиция.

В случае текста на естественном языке нами разработаны или находятся в процессе разработки алгоритмы, направленные на:

- автоматическое получение групп (множеств) глагольных синонимов одинакового значения (нечетких классов эквивалентности);
 - автоматическое приписывание значений функции принадлежности нечеткого отношения «сходство» на множествах глагольных синонимов одинакового значения;
 - автоматическое выявление нечетких свойств нечетких отношений (нечеткая рефлексивность, нечеткая симметричность, нечеткая транзитивность и т.д.) на множествах глагольных синонимов одинакового значения;
 - автоматическое выявление обобщающих слов, остающихся инвариантным для множеств глагольных синонимов (элемента нечеткого класса эквивалентности, на котором достигается высота данного нечеткого класса);
 - автоматическое выявление семантически синонимичных словосочетаний (например: «սեղան դնել» = «սեղան գցել» = «սեղան րացել» и т.д.);
 - автоматическое выявление и анализ тех предложений, смыслом (= целью) которых является задание локального контекста.
- Подробности этих методов мы пока не можем описать.

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] ABBYYLingvox3
- [2.] *Vahradyan V.* A Model of a High Level Chess Concept “Beautiful Mate”,
<http://www.computer.org/csdl/proceedings/csit/2013/2460/00/06710348.pdf>
- [3.] *Теньер Л.* Основы структурного синтаксиса. М.: Прогресс, 1988. 656 с.

МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ ИМИТАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ БОЕВЫХ ДЕЙСТВИЙ

В.С. Егиазарян, С.Х. Нахатакян, А.В. Гаспарян

Аннотация

В данной работе предлагается методология разработки имитационной системы боевых действий (ИСМБД), которая в значительной степени должна повысить эффективность управления вооруженными силами (ВС).

Ключевые слова: системы нечеткого логического вывода, интеллектуальные системы, экспертные системы, АСУ, математические модели.

ՄԱՐՏԱԿԱՆ ԳՈՐԾՈՂՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՄՈԳԵԼԱՎՈՐՄԱՆ ԻՄԻՏԱՅԻՈՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԱՏԵՂԾՄԱՆ ՄԵԹՈԴԸ

Վ.Ս. Եղիազարյան, Ս.Խ. Նահատակյան, Հ.Վ. Գասպարյան

Ամփոփում

Առաջարկվում է ռազմական գործողությունների իմիտացիոն համակարգի ստեղծման մեթոդը, որը պետք է բարձրացնի մարտական խնդիրների լուծման արդյունավետությունը:

Հիմնաբառեր՝ ոչ հստակ հետևության համակարգ, մոդելավորման համակարգեր, փորձագիտական համակարգեր, ավտոմատ կառավարման համակարգ, մաթեմատիկական մոդելներ:

THE METHOD OF DEVELOPMENT OF THE MILITARY OPERATIONS IMITATING SYSTEM

V. Yeghiazaryan, S. Nahatkyan, H. Gasparyan

Summary

The method of development of the military operations imitating system is offered. It should substantially raise the management productivity of armed forces.

Keywords: fuzzy inference system, simulation systems, expert systems, automatic management system, mathematical models.

Любая целесообразная деятельность, в том числе и военная, обязательно включает предвидение ее результатов. Моделирование боевых действий и прогнозирование, как особый метод научного познания, играет важнейшую роль в управлении современными войсками. Цель моделирования – исследование динамики протекания процесса вооруженной борьбы и оценка показателей эффективности боевых действий. Под такими показателями понимается численная мера степени выполнения боевой задачи, которую количественно можно представить, например, относительной величиной предотвращаемого ущерба объектам обороны или наносимого противнику ущерба. Процессы вооруженной борьбы могут анализироваться аналитическими и стохастическими методами. Известны также комбинированные модели, когда часть процессов исследуется стохастическими методами, а остальные – аналитическими.

Здесь следует отметить, что более актуальными на данный момент и современными считаются модели, использующие аппарат нечетких правил. Можно также отметить и «модную» сейчас сетевую концепцию организации управления войсками и боевыми действиями, которая пока мало отражена в соответствующих оптимизационных (теория графов) и игровых (теория игр) моделях.

Поскольку модели, построенные на основе алгоритмов нечеткого вывода, различаются, главным образом, видом используемых правил или знаний, логических операций и разновидностью метода дефазификации, то следует отметить принятые методы классификации знаний – как понятийных или концептуальных знаний, конструктивных, процедурных, алгоритмических или фактографических знаний. Часто рассматриваются также другие различные модели представления знаний: семантические и ассоциативные сети, модели «сущность-связь», бинарные модели, логические модели.

Даже при беглом обзоре практического опыта и исследования разработок систем нечеткого логического вывода с обеспечением требуемого уровня работоспособности и прозрачности моделей можно убедиться в том, что сроки и стоимость их проектирования значительно меньше, чем при использовании традиционного математического аппарата. В связи с этим можно отметить известные модели нечеткого вывода Л. Заде, Мамдани, Сугено, Ларсена, Цукамото. Таким образом, математическое моделирование является основой методики расчетов, а также разработки и использования логико-математических моделей. В настоящее время в этой области получены определенные теоретические и экспериментальные результаты, полная систематизация и обобщение которых пока еще не выполнены, возможно, вследствие частного характера отдельных исследований. В статье авторами сделана попытка систематизировать процессы моделирования военного характера и опи-

сать методологию разработки имитационной системы моделирования боевых действий на основе имеющихся в потенциале математических моделей и расчетно-информационных задач, при этом, учитывая, что одной из сложнейших задач моделирования является методический вопрос принципов самого построения модели и ее выбора по показателям эффективности. Выбор типа модели и степени ее точности определяется целями исследования, характером исходных данных, уровнем изученности моделируемого процесса и возможности практической реализации [1]. Поскольку моделирование крупных систем и сложных процессов для поддержки принятия решений в части применения ВС требует интеграции известных и выбранных моделей (математических описаний), то авторы предлагают разработать единую информационно-моделирующую среду (ИСМБД), включающую в себя частные имитационные модели объектов и процессов. То есть создать взаимосвязанную многоуровневую систему математических (имитационных) моделей с тремя уровнями детализации:

1. виртуальное боевое пространство;
2. аналитические, штабные модели средней детализации;
3. информационно-расчетные задачи.

При разработке ИСМБД необходимо формировать перечень информационно-расчетных задач и моделей основных функций военного управления. Кроме этого, в интересах обоснованного выбора математической схемы при построении модели целесообразно провести ее классификацию по цели моделирования, способу реализации, типу внутренней структуры, сложности объекта моделирования, способу представления времени. Так, например, в зависимости от способов построения боевых порядков принято рассматривать модели следующих видов вооруженных столкновений: дуэльные бои, боевые действия линейных группировок и боевые действия группировок, распределенных в пространстве или на плоскости. Если рассматривать виртуальное боевое пространство, то оно должно включать сценарии для имитационных моделей с различной детализацией их описания, а также имитационные модели систем и средств военного назначения, отражающие свойства отдельных образцов вооружения и военной техники. Современная конструктивная система моделирования, разрабатывается с использованием математических средств для автоматизированных систем управления (АСУ) специального назначения, которая, используя событийное время, может имитировать деятельность и взаимодействие военных подразделений. В рамках ИСМБД, входящей в АСУ, должны прорабатываться вопросы создания трехмерного виртуального боевого пространства, учета погодных условий и особенностей рельефа местности, тылового обеспечения боевых действий, создания четкой системы ин-

формационных потоков, а также вопросы поддержки принятия решений в системе управления и контроля [2]. Таким образом, по классификационному признаку типа внутренней структуры модель должна быть составной и многокомпонентной, по способу реализации она должна обеспечивать имитационное моделирование боевых действий. Поскольку ИСМБД должна строиться на основе комплекса информационно-расчетных задач и моделей, то ниже приводится классифицированный перечень боевых действий.

I. Определено, что особенная значимость ИСМБД должна проявляться при разработке и проверке перспективных стратегических концепций, развития форм и способов боевого применения ОФ (оперативных формирований) в условиях крупномасштабных боевых действий, поэтому ее функции должны качественно отличаться:

1. использованием модульной системой моделирования сети межтеатровых воинских перевозок и усовершенствованным блоком моделирования системы управления ОФ;
2. возможностью моделирования ударов по мобильным целям;
3. использованием геоинформационной и геофизической базой данных;
4. возможностью принятия решений, основанных на базе знаний по тактическим нормативам, а также предпочтениях лиц, принимающих решения;
5. использованием моделью информационных операций, имитируемых прямое воздействие на системы связи, обнаружения и обработку информации противника.

II. Модели боевых действий должны вытекать из реализации различных алгоритмов или нечетких правил, которые меняются в зависимости от характера моделируемой деятельности и функциональных возможностей, связанного с ней алгоритма, определяющего возможности использования:

1. модели тылового обеспечения с учетом автономности, планирования;
2. перевозок сил и средств воздушными, железнодорожными, автомобильными средствами;
3. новых информационных технологий и инновационных концепций системы управления и системы единой карты оперативной обстановки, исходя из восприятия ситуации каждой стороной на базе анализа оперативной обстановки и т.п.;
4. создания основы для принятия решения с использованием аналитической оценки сложившейся ситуации;

5. состояния противника;
6. модели оценки реализации конечной цели военной операции, например, в виде:
 - изменения политики руководства государства;
 - описания проработанных критериев достижения победы (географических и т.д.);
 - отсутствия подразделений противника на определенной территории.

III. Так как основным элементом моделирования должен являться объект боевого пространства, в котором номинальный уровень детализации – это батальон для общевойсковых операций, эскадрилья для воздушных операций, разведывательные платформы для систем разведки и наблюдения, а также вспомогательные объекты боевого пространства, такие как, объекты инфраструктуры (железные дороги, вокзалы, аэродромы и т. п.), пункты управления (штабы, командные пункты, узлы связи и т. п.), то ИСМБД должна обрабатывать данные по:

1. объектам боевого пространства, которые характеризуются статическими (например, радиус поражения ударных средств) и динамическими (в частности, координаты местоположения) свойствами;
2. информации о взаимодействии объектов друг с другом и внешней средой;
3. модели, позволяющей рассмотреть методы и расчеты, реализующие такие возможности, как, например, надежно поражать значительное количество танков, боевых машин пехоты и других видов боевой техники на больших площадях, в короткие сроки, выводить из строя целые элементы боевого построения войск задолго до вступления их в бой – это позволит повысить живучесть войск, систем управления, упреждать противника в действиях;
4. модели развертывания войск и разгрома противника во встречном бою;
5. модели маневра, маскировки, противовоздушной обороны, радиоэлектронной борьбы для обеспечения надежности управления войсками в бою.

Все взаимодействия между объектами боевого пространства представляют собой события моделирования. Модель действий ВС должна поддерживать решение около 20 видов типовых задач. Также должны описываться: процессы непосредственной авиационной поддержки, нанесения массированных авиационных ударов, обеспечения

ПВО районов боевых действий, уничтожения наземных, воздушных целей, подавления системы ПВО противника, массированного обстрела, целеуказания и наведения при временных ограничениях, дозаправки в воздухе и т. д. Модель действий ПВО на театре военных действий (ТВД) должна базироваться на оценке действий системы. Процесс принятия решений должен быть основан на базе знаний по тактическим нормативам, а также предпочтениях лиц, принимающих решения.

ИСМБД должна позволять моделировать работу средств разведки, оценивать процессы восстановления системы управления после воздействия противника. При моделировании информационных операций имитируется прямое воздействие на системы связи, обнаружения и обработки информации противника.

При моделировании функционирования ВС нужно учитывать планируемую модернизацию (перспективный облик) сил и средств, процессы контроля, имитацию боевых операций информационной войны.

IV. Тыловое обеспечение моделируется с учетом автономности, планирования:

1. перевозок сил и средств воздушным, железнодорожным, автомобильным транспортом;
2. новых информационных технологий и инновационных концепций системы управления и системы единой карты оперативной обстановки и др.

ИСМБД должна включать экспертную систему с выводом [3], на основе решающих правил «если..., то..., иначе...». Обновление базы знаний (значений фактов, правил) о противнике должно осуществляться в результате информационного процесса разведки. Решающие правила базы знаний должны являться ключевыми для динамического функционирования модели. При оценке оперативной обстановки должна использоваться цифровая географическая карта с нанесенной сеткой координат.

V. Процесс ассоциации и корреляции результатов работы различных разведывательных средств в условиях единого информационного пространства в ИСМБД должен заключаться в следующем:

1. результаты обнаружения каждого средства разведки наносятся на ситуационную карту;
2. экстраполируются позиции каждого из ранее обнаруженных объектов во времени к моменту поступления новых докладов о результатах работы средств разведки.

VI. Событийные модели выбираются с учетом характера алгоритмов, используемых в ИСМБД, для выполнения:

1. вероятностного – вычисления на основе генераторов случайных чисел, дискретных выходных величин – моделирования процессов обнаружения, планирование ударов ВВС по наземным целям, ПВО на ТВД и т.д.
2. детерминированного вычисления (аналитические на основе формул теории вероятностей) - моделирование процессов применения и защиты, маневрирования боевыми силами и средствами.
3. реагирование динамически в интерактивном режиме на происходящие события, исходя из восприятия ситуации каждой стороной на базе анализа оперативной обстановки;
4. принятия решения с использованием аналитической оценки сложившейся ситуации.

Программная система ИСМБД должна состоять из нескольких модулей, например: функционального, имитационного и системного – это разделение будет зависеть от конкретно выполняемых задач их иерархии, способов и методов реализации, что должно объединить их в единый комплекс. Таким образом, в ИСМБД должна быть установлена жесткая иерархия командной линии постановки задач, которая позволит в целом имитировать реальную оценку выполнения задач подчиненными подразделениями и вырабатывать оптимальные варианты их боевого применения. Другими словами, вышестоящие инстанции будут ставить боевую задачу и вводить ограничения для ее решения. В ПО ИСМБД должны быть заложены возможности создания причинно-следственных связей, главная цель которых состоит в том, чтобы в автоматизированном режиме воспроизводить поведение подразделения, исходя из складывающейся боевой обстановки. Как отмечалось выше, практика использования моделей, описываемых в литературе, показывает, что наборы нечетких правил – это хороший инструмент для принятия сложных решений, так как они не только обеспечивают возможность выбора среды predetermined вариантов действий, но и позволяют генерировать новые [3]. Самые простые правила, которые будут использовать программы – это элементарные логические отношения (больше чем, и, или и т.д.), в то время как более сложные рассуждения о том, благоприятна ли ситуация или нет, будут строиться на основе более сложных отношений (если, то, иначе). Выбор интеллектуальных моделей актуален, например, для подразделения войск, которое в системе может иметь разнообразные возможности и способно выполнять различные действия или задачи одновременно [2, 3], если они не противоречат друг другу (оставаться на месте и передвигаться). Действия подразделения могут быть изменены в зависимости от полноты данных о ситуации. Например, сталкиваясь с превосходящими силами противника, подразделение, обладающее неполной информацией относительно

но местоположения других своих сил, может отступить, пока ситуация не станет более определенной. Чем более сомнительна ситуация, тем раньше будет начато отступление. Как только ситуация определится, могут быть предприняты специальные действия, соответствующие моменту. Для моделирования подобных процессов можно воспользоваться известным на сегодня пакетом прикладных программ “Fuzzy Logic Toolbox”, в том числе и принципами обобщенной схемы нечеткого вывода Мамдани и Такаги-Сугено, а также моделирующими системами нечеткого логического вывода Л. Заде. Так, для обеспечения действий небоевых подразделений должны разрабатываться соответствующие правила, которые, например, заставят их менять курс, чтобы избежать столкновений с противником. Боевые и небоевые подразделения, подчиня приказу общего начальника о перемещении в определенное местоположение, должны определять свой маршрут на основе имеющихся правил [3]. В связи с этим возможны существенные различия в их маршрутах. Обеспечение ресурсами подразделений в ИСМБД может осуществляться возможностью оперировать нечеткими входными данными: например, непрерывно изменяющиеся во времени значения (динамические задачи), значения, которые невозможно задать однозначно, часть из которых в определенных условиях обстановки предпочтительнее, но, при этом, любой из них отвечает минимальным требованиям:

- возможности нечеткой формализации критериев оценки и сравнения: оперирование критериями «большинство», «возможно», «преимущественно» и т.д.;
- возможности проведения качественных оценок как входных данных, так и выходных результатов, то есть можно оперировать не только значениями данных, но и их степенью достоверности и распределением.

Основными средствами и инструментами проектирования моделей и решения информационно-расчетных задач как аналитического или стохастического, так и интеллектуального характера, должна являться среда MATLAB последних версий [4]. В перспективе можно выполнить глобальное комплексирование моделей с заданной степенью точности, оперируя принципами поведения системы, описанными fuzzy-методами. Это позволит обеспечить доступ пользователей как к оперативной, так и физической моделируемой среде, к стандартизированным моделям и базам данных, а также к различного рода сценариям с высокой степенью точности моделирования действий на фоне искусственно созданной боевой обстановки, воспроизводящей особенности любого ТВД (театра военных действий).

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] <http://swsys.ru/index.php?page=article&id=2463>. Выбор математической схемы при построении модели боевых действий. Программные продукты и системы, ЦНИИ Министерства обороны России. Тверь: Международный журнал, № 1, 2010.
- [2.] *Орлов А.И.* Теория принятия решений. М.: Изд-во «Март», 2004.
- [3.] *Заде Л.А.* Роль мягких вычислений и нечеткой логики в понимании, конструировании и развитии информационных (интеллектуальных) систем. М.: Новости искусственного интеллекта, 2001.
- [4.] *Штобва С.Д.* Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия Телеком, 2007.

САМООРГАНИЗУЮЩИЕСЯ СЕТИ В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ ДАННЫХ

А.С.Овакимян, С.Г. Саркисян, Н.Г. Испирян

ahovakimyan@ysu.am, siranushs@ysu.am,
nispiryan@ysu.am

Аннотация

В работе рассмотрена задача построения и реализации нейронной сети типа самоорганизующейся карты для решения задачи классификации данных. Нейронная сеть получает на входе входной вектор, выполняет предварительную обработку по выделению существенных компонентов во входных данных, и затем решает задачу классификации. Экспериментально изучено поведение построенной сети для разных задач классификации и подобраны значения параметров сети, обеспечивающие ее эффективную работу.

Ключевые слова: самоорганизующаяся карта, классификации данных, параметры нейронной сети.

ԻՆՔՆԱԿԱԶՄԱԿԵՐՊՎՈՂ ՔԱՐՏԵՐԸ ՏՎՅԱԼՆԵՐԻ ԳԱՍԱԿԱՐԳՄԱՆ ԽՆԳԻՐՆԵՐՈՒՄ

Ա.Ս. Հովակիմյան, Ս.Գ.Սարգսյան, Ն. Հ. Իսպիրյան

Ամփոփում

Աշխատանքում դիտարկված է ինքնակազմակերպվող քարտ տիպի նեյրոնային ցանցի կառուցման և իրականացման խնդիրը տվյալների դասակարգման համար: Ցանցը ստանում է մուտքային տվյալների վեկտորը, առանձնացնում է տվյալներում էական բաղադրիչները, ապա կատարում է տվյալների դասակարգում: Ուսումնասիրվել է ցանցի վարքագիծը դասակարգման տարբեր խնդիրների համար: Ընտրվել են ցանցի պարամետրերի այնպիսի արժեքներ, որոնք ապահովում են ցանցի աշխատանքի արդյունավետությունը:

Հիմնաբառեր՝ ինքնակազմակերպվող քարտ, տվյալների դասակարգում, նեյրոնային ցանցի պարամետրեր:

SELF-ORGANIZED MAPS IN DATA CLASSIFICATION TASKS

A. Hovakimyan, S. Sargsyan, N. Ispiryan

Summary

In the paper a problem of constructing and implementing of a neural network for data classification is considered. The self-organizing map is chosen to solve the problem.

The neural network receives the input vector, preprocesses to separate essential components in the input data, and determines a class what the data belong to. The behavior of created network is studied for different tasks of classification. Via experiments the values of network parameters are selected to ensure the network effective performing.

Keywords: self-organizing map, data classification, neural network parameters.

Среди задач Data Mining особое место занимают задачи классификации данных. В этих задачах входные данные должны быть соотнесены к одному из заранее известных классов на основе информации об уже имеющихся данных.

Существует много способов решения задач классификации данных, среди которых используются также искусственные нейронные сети [1]. Наиболее эффективны нейросетевые технологии на задачах, где необходимо обрабатывать неполную и нечеткую информацию.

В настоящее время нейросетевые вычисления разного уровня реализации от специализированных аппаратных средств до нейросетевых пакетов программ находят все более широкое применение. Они успешно применяются для решения ряда задач, таких как: прогнозирование экономических и финансовых показателей, предсказание возможных осложнений у больных в послеоперационный период, биометрической идентификации на основе разных характеристик, обработке изображений и др. Все это возможно для нейронных сетей, благодаря их способности к обучению, установлению ассоциативных связей во входных данных. Как правило, в зависимости от задачи, приходится прибегать к разным методам по преобразованию входных данных, позволяющих правильно судить о тех закономерностях и особенностях в данных, которые отражают их качественные характеристики. Встает задача фильтрации данных и их отображение в пространство меньшей размерности.

В нейросетевых технологиях особо важную роль играют подбор архитектуры сети и значений ее параметров, влияющих на эффективность ее работы.

В работе рассмотрена задача построения и реализации нейронной сети типа самоорганизующейся карты для решения задачи классификации данных. Нейронная сеть получает на входе входной вектор, выполняет предварительную обработку по выделению существенных компонентов во входных данных, затем решает задачу классификации. Экспериментально изучено поведение построенной сети для разных задач классификации и подобраны значения параметров сети, обеспечивающие ее эффективную работу.

1. Нейронные сети и самоорганизующиеся карты

Искусственная нейронная сеть (ИНС) является математической моделью биологического нейрона. Она состоит из связанных друг с другом нейронов. Нейронная сеть подвергается обучению путем представления ей входной информации в виде числовых последовательностей. В ходе обучения настраиваются внутренние связи между нейронами, благодаря которым сеть наделяется способностью распознавать незнакомые образы.

Существуют различные типы нейронных сетей, которые различаются как топологией, так и алгоритмами обучения. В задачах классификации образов одними из наиболее эффективных являются самоорганизующиеся карты (СОК), которые обучаются алгоритмами без учителя. СОК состоит из двух слоев: входного и функционального. В функциональном слое нейроны расположены на сетке, состоящей из ячеек. Каждый нейрон занимает одну ячейку и связан со всеми нейронами входного слоя (Рис.1).

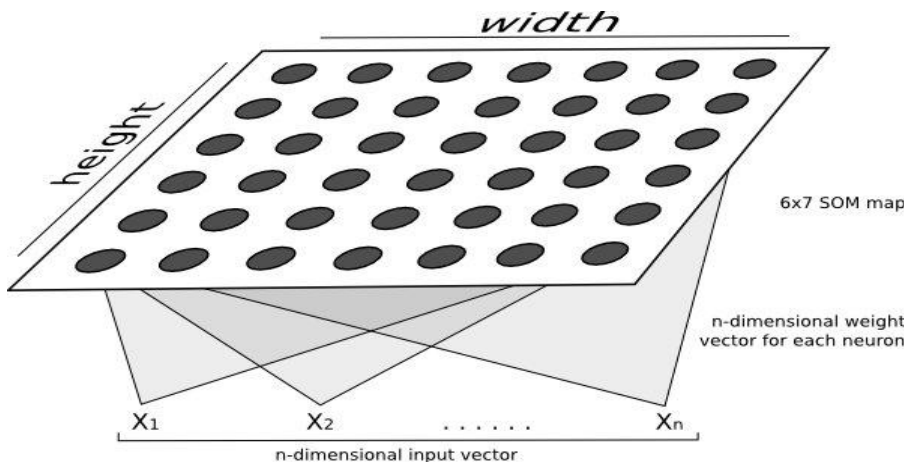


Рис.1. Структура самоорганизующейся карты.

СОК действует по принципу «победитель получает все». То есть, когда последовательность входных векторов предъявляется сети, все нейроны функционального слоя вызывают функцию активации, которая отражает связь между входными данными и весовыми характеристиками этих нейронов. Победителем становится тот нейрон, для которого функция активации принимает оптимальное значение, например максимальное или минимальное. В данном случае в качестве функции активации выбрана функция евклидова расстояния между вектором входных данных и весовым вектором нейрона, а оптимальным значением функции считается ее минимальное значение. Если $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$ – входной вектор, а функциональный слой СОК состоит из k нейронов, то победителем будет тот нейрон, для которого

$$\sqrt{\sum_{j=1}^n (V_j - W_{ij})^2} = \min, \quad i = 1, \dots, k$$

где W_{ij} – весовой коэффициент i -ого нейрона функционального слоя, связанного с j -ым нейроном входного слоя.

На этапе обучения сети предъявляется обучающая последовательность данных. Суть обучения состоит в том, что на каждом шаге определяется нейрон-победитель, и нейроны, расположенные в некоторой окрестности нейрона-победителя, все больше приближаются к нему. В результате обучения близкие по назначению нейроны собираются в областях сетки, определяемых обучающей последовательностью.

Радиус окрестности нейрона-победителя меняется по формуле:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right), \quad t = 1, 2, 3, \dots$$

В качестве начального значения радиуса окрестности берется

$$\sigma_0 = \frac{\max(\text{width}, \text{height})}{2},$$

где width – ширина сетки функционального слоя, height – высота, λ – временная константа, вычисляемая по формуле

$$\lambda = \frac{n}{\log \sigma_0},$$

где n – число итераций обучения.

В ходе обучения сети нейрон-победитель и нейроны из его σ -окрестности меняют свои весовые коэффициенты следующим образом:

$$W(t+1) = W(t) + \theta(t)L(t)(V(t) - W(t)),$$

$$L(t) = L_0 \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right), \quad t = 1, 2, 3, \dots$$

где t – номер итерации,

$$\theta(t) = \exp\left(-\frac{dist^2}{2\sigma^2(t)}\right), t = 1, 2, 3, \dots$$

$dist$ – расстояние между нейроном и нейроном-победителем на сетке функционального слоя. Функция $L(t)$ называется коэффициентом обучения, $\theta(t)$ отражает влияние расположения нейрона на сетке. Очевидно, что больше всего меняется вес победившего нейрона (Рис. 2).

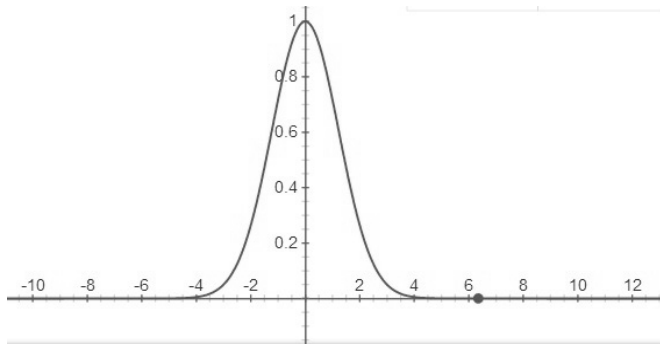


Рис. 2. Влияние расстояния от нейрона-победителя на изменение весов

Перед обучением сети выполняется преобразование входных векторов по выделению главных компонент, в результате которого уменьшается размерность входного пространства и, следовательно, число нейронов входного слоя сети [2]. Обученная сеть тестируется на контрольных входных данных и оценивается эффективность ее работы. Обученная и протестированная нейронная сеть способна распознать данные, похожие на те, на которых она обучена.

2. Экспериментальная настройка параметров самоорганизующейся карты

Разработана и программно реализована нейронная сеть типа самоорганизующейся карты для решения классификации данных. Разработана библиотека специальных Java- классов, обеспечивающая параллельную обработку данных [3]. Сеть апробирована для ряда задач классификации данных с целью экспериментальной настройки ее параметров.

Самоорганизующаяся карта имеет четыре параметра, от значений которых зависит эффективность работы сети. Этими параметрами являются количество внутренних нейронов сети, характеристика сетки, выражаемая отношением ширины сетки, на которой расположены нейроны, к ее высоте, начальный коэффициент обучения, число итераций

обучения. На основе экспериментов найдены значения параметров сети, при которых для классификации данных сеть работает наиболее эффективно.

В экспериментах количество нейронов берется кратным количеству обучающих векторов и оценивается зависимость доли правильно классифицированных данных от значения коэффициента кратности. Оказывается, что эффективность сети вначале резко растет при увеличении коэффициента кратности. Затем показатель эффективности не меняется. Это предельное значение коэффициента кратности равно 10. Другими словами, сеть является наиболее эффективной, когда количество нейронов примерно в 10 раз больше, чем количество обучающих данных.

Другим параметром сети является форма прямоугольника сетки функционального слоя. Этот параметр выражается отношением высоты сетки к ее ширине. Эксперименты показывают, что при увеличении отношения высоты сетки к ее ширине эффективность сети растет, и при значении, равном 100, она почти перестает расти. Это значение выбрано в качестве наилучшего значения для данного параметра сети.

Два других параметра сети связаны с обучением сети. Первым является начальный коэффициент обучения. Сначала, при увеличении значения параметра эффективность сети растет, но после достижения коэффициентом обучения значения 0.1, она начинает убывать. Таким образом, значение 0.1 для начального коэффициента обучения считается оптимальным для рассматриваемой задачи.

Последний параметр сети, от которого зависит ее эффективность, – это число итераций обучения. Исследована зависимость доли правильно классифицированных образов от числа итераций. Эксперименты показывают, что вначале, при увеличении числа итераций эффективность сети растет. Но при достижении значения 100, она уже почти не меняется. Поэтому, можно сделать вывод, что в качестве наилучшего числа итераций можно считать значение 100.

Таким образом, на основе экспериментов по апробации самоорганизующейся карты и анализа исследуемых параметров, можно констатировать, что эффективность нейронной сети типа самоорганизующейся карты для задачи классификации образов при соответствующем подборе значений параметров может составить в среднем 95%.

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] *Anil K. Jain, Jianchang Mao, Mohiuddin K.M.* Artificial Neural Networks: A Tutorial. Computer – Special issue: neural computing:

companion issue to Spring 1996 IEEE Computational Science & Engineering, Volume 29, Issue 3, March 1996.

- [2.] *Jolliffe I.T.* Principal Component Analysis (Springer Series in Statistics), Springer; 2nd edition (October 2, 2002).
- [3.] *Hovakimyan A., Sargsyan S., Nazaryan A.* Self-Organizing Map Application for Iris Recognition. Journal of Commun. & Comput. Eng. ISSN 2090-623, www.m-sciences.com, Volume 3, Issue 2, 2013. PP. 10–13.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

С.Г. Саркисян, А.С. Овакимян
siranushs@ysu.am, ahovakimyan@ysu.am

Аннотация

В работе рассмотрена задача оценки эффективности работы нейронной сети, основанная на исследовании вероятностного поведения сети. Рассматриваются сети прямого распространения, состоящие из слоя входных узлов, скрытых слоев и выходного слоя. Для таких сетей получены оценки для некоторых статистических характеристик нейронной сети в случае двух распознаваемых классов.

Ключевые слова: нейронная сеть, вес нейрона, распознавание стимула.

ՆԵՅՐՈՆԱՅԻՆ ՑԱՆՑԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԱՐԿՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄ

Սարգսյան Ս., Հովակիմյան Ա.

Աշխատանքում դիտարկված է նեյրոնային ցանցի աշխատանքի արդյունավետության գնահատման խնդիրը ցանցի հավանականային վարքի ուսումնասիրության հիման վրա: Դիտարկվում են ուղիղ տարածման ցանցերը, որոնք կազմված են մուտքային, թաքնված և ելքային նեյրոնների շերտերից: Այդ ցանցերի համար ստացված են որոշ հավանականային բնութագրիչների գնահատականները երկու դասերի դեպքի համար:

Հիմնաբառեր՝ նեյրոնային ցանց, նեյրոնի կշիռ, ազդանշանի ճանաչում:

EVALUATING THE PERFORMANCE OF NEURAL NETWORK

Sargsyan S., Hovakimyan A.

In this paper the problem of evaluating the performance of the neural network, based on a study of the probabilistic behavior of the network is considered. Direct propagation network consisted of layer of input nodes, hidden layer and output layer is examined. For such networks estimates for some of the

statistical characteristics of the neural network in the case of two recognized classes were obtained.

Keywords: neural network, the weight of the neuron, recognition of the stimulus.

Искусственные нейронные сети часто используются для решения разных прикладных задач, в частности, задач распознавания образов. Для успешного применения искусственных нейронных сетей необходимо правильно выбрать архитектуру сети, подобрать ее параметры, пороговые значения элементов, функции активации и др. [1, 2, 3]. Особый интерес представляет исследование вероятностного поведения нейронной сети [4].

В данной работе получены оценки для некоторых статистических характеристик нейронной сети в случае двух распознаваемых классов.

Исследуется нейронная сеть прямого распространения, состоящая из слоя входных узлов, скрытых слоев и выходного слоя. Нейроны имеют однонаправленные связи, не содержат связей между элементами внутри слоя и обратных связей между слоями. Нейроны входного слоя соединены с нейронами скрытого слоя возбуждающими и тормозящими связями случайным образом. Выходы всех нейронов скрытого слоя соединены с нейронами выходного слоя. Нейроны в каждом слое именуется как входные, скрытые и выходные элементы соответственно [1, 3].

Если каждый класс имеет соответственно l_1 и l_2 представителей, то после обучения по последовательности $L=l_1 + l_2$ возбудителей двух классов, в k -ом скрытом элементе накапливается вес

$$V_k = \sum \delta_i \sum \eta_k(j) + V_0, \quad (i=1,2), (j=1,l_i)$$

где V_0 – первоначальный вес k -ого скрытого элемента.

При появлении на входе сети возбудителя ξ_t на вход выходного слоя подается вес $(k=1, \dots, N_A)$

$$U_t = \sum V_k \eta_k(t) = \sum (\sum \delta_j \sum \eta_k(j) + V_0) \eta_k(t)$$

Предположим $V_0=0, l_1=l_2=1$, тогда $U_t = \sum \sum \delta_i \sum \eta_k(j,t)$

где

$$\eta_k(j,t) = \begin{cases} 1, & \text{если } k\text{-ый скрытый элемент активен для } \xi_j \text{ и } \xi_t \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Принадлежность возбудителя ξ_t к одному из двух классов определяется сравнением веса U_t с порогом выходного элемента R . При $U_t > \theta_R$ имеем первый класс. При $U_t < \theta_R$ – второй класс. При $U_t = \theta_R$ – отказ от распознавания.

Для данной сети, заданной обучающей последовательности и данного контрольного стимула ξ_t вес U_t имеет определенное значение. Однако, для класса нейронных сетей, U_t является случайной величиной. Для определения вероятности того, что сеть, выбранная из некоторого класса правильно классифицирует стимул ξ_x , нужно вычислить вероятностные характеристики случайной величины веса U_x , поступающего на вход выходного слоя.

Согласно видоизмененному неравенству Чебышева [5], для любой случайной величины z с математическим ожиданием $Mz = \mu$ и дисперсией $Dz = \sigma^2$ имеют место следующие соотношения

$$P(z > 0) \geq 1 - 1/(\mu^2/\sigma^2) = 1 - \sigma^2/\mu^2, \text{ при } \mu > 0 \quad (1)$$

$$P(z < 0) \geq 1 - 1/(\mu^2/\sigma^2) = 1 - \sigma^2/\mu^2, \text{ при } \mu < 0$$

где P – вероятность соответствующего события, σ – среднее квадратическое отклонение.

Соотношения (1) можно применить для оценки вероятности правильной реакции сети с $\theta_R = 0$ на ξ_x в случае двух распознаваемых классов. Из формулы (1) следует, что вероятность правильного распознавания повышается, если отношение σ^2/μ^2 стремится к нулю.

Имея соответствующие вероятностные характеристики сети, можно оценить вероятность правильной реакции сети на ξ_x . Очевидно, что если отношение $\sigma^2(U_x)/\mu^2(U_x)$ может быть сделано сколь угодно малым, то для выбранной сети с $\theta_R = 0$ вероятность того, что стимул ξ_x классифицируется правильно, стремится к единице.

Пусть N_A – количество скрытых элементов сети, $L = l_i + l_j$, l_i (l_j) – длина обучающей последовательности i -ого (j -ого) класса, δ_i (δ_j) – приращение веса скрытого элемента при показе одного стимула из i -ого (j -ого) класса возбудителей, P_i – вероятность возбуждения скрытого элемента при показе стимула из i -ого класса, P_{ij} – вероятность возбуждения скрытого элемента при показе стимулов из i -ого и j -ого классов. Для нахождения математического ожидания веса на входе выходного слоя доказана следующая теорема [4].

Теорема. Пусть, дано множество возбудителей $\Omega = \{ \xi \}$, $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$, $\Omega_1 \cap \Omega_2 = \emptyset$, и обучающая последовательность $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_L$. Тогда математическое ожидание веса на входе выходного слоя в том случае, когда стимул из i -ого класса, равно

$$\mu_i = N_A (\delta_i P_{1i} l_i + \delta_j P_{1j} l_j); \quad i, j = 1, 2 \quad i \neq j$$

Имея μ_i , оценим дисперсию случайной величины U_x , при появлении на входе сети возбудителя ξ_x . Для $j = 1, \dots, L$ и $r = 1, \dots, L$ получаем

$$\sigma^2(U_x) = N_A L^2 \sum_{j=1}^L \sum_{r=1}^L v_j v_r \delta_j \delta_r (P_{jrx} - P_{jx} * P_{rx}),$$

где P_{jx} - вероятность возбуждения скрытого элемента при показе стимулов ξ_j, ξ_x , P_{rx} - вероятность возбуждения скрытого элемента при показе стимулов ξ_r, ξ_x , P_{jrx} - вероятность возбуждения скрытого элемента при показе стимулов ξ_j, ξ_r, ξ_x .

Так как отношение $\sigma^2(U_x)/\mu^2(U_x)$ не зависит от длины обучающей последовательности, то любое число повторений одной и той же обучающей последовательности не изменяет характеристики системы.

Рассмотрим отношение $\sigma^2(U_x)/\mu^2(U_x)$ для контрольного стимула ξ_x в случаях, если $\xi_x \in \Omega_1$ и $\xi_x \in \Omega_2$. Оценивая вероятности P_{jrx}, P_{jx}, P_{rx} получим выражения для дисперсии.

Выделим следующие случаи.

Первый случай: предположим, что контрольный стимул $\xi_x \in \Omega_1$. Для стимулов ξ_j и ξ_r в рассматриваемом случае получим следующие вероятности.

- а) Если $\xi_j \in \Omega_1$ и $\xi_r \in \Omega_1$, то $P_{jrx} = P_{jx} = P_{rx} = P_1$
- б) Если $\xi_j \in \Omega_1$ и $\xi_r \in \Omega_2$, то $P_{jrx} = P_{12}$, $P_{jx} = P_1$, $P_{rx} = P_{12}$
- в) Если $\xi_j \in \Omega_2$ и $\xi_r \in \Omega_1$, то $P_{jrx} = P_{12}$, $P_{jx} = P_{12}$, $P_{rx} = P_1$
- г) Если $\xi_j \in \Omega_2$ и $\xi_r \in \Omega_2$, то $P_{jrx} = P_{12}$, $P_{jx} = P_{12}$, $P_{rx} = P_{12}$

Вычислим отношение $\frac{\sigma_1^2(U_x)}{\mu_1^2(U_x)}$ для этих случаев.

$$\text{а) } \frac{\sigma_1^2(U_x)}{\mu_1^2(U_x)} = \frac{\sum_{j=1}^L \sum_{r=1}^L v_j v_r \delta_j \delta_r (P_1 - P_1^2)}{N_A \sum_{j=1}^L \sum_{r=1}^L v_j v_r \delta_j \delta_r P_1^2} = \frac{1 - P_1}{N_A P_1}$$

$$\text{б) } \frac{\sigma_1^2(U_x)}{\mu_1^2(U_x)} = \frac{\sum_{j=1}^L \sum_{r=1}^L v_j v_r \delta_j \delta_r (P_{12} - P_1 * P_{12})}{N_A \sum_{j=1}^L \sum_{r=1}^L v_j v_r \delta_j \delta_r P_1 * P_{12}} = \frac{1 - P_1}{N_A P_1}$$

$$\text{в) } \frac{\sigma_1^2(U_x)}{\mu_1^2(U_x)} = \frac{(P_{12} - P_{12} * P_1)}{N_A P_1 P_{12}} = \frac{1 - P_1}{N_A P_1}$$

$$\text{г) } \frac{\sigma_1^2(U_x)}{\mu_1^2(U_x)} = \frac{(P_{12} - P_{12}^2)}{N_A P_{12}^2} = \frac{1 - P_{12}}{N_A P_{12}}$$

Вероятность распознавания для первого класса повышается при максимальном значении величины $P_1 - P_{12}$, называемой характеристической функцией перцептрона (ХФП) [5]. Очевидно, функция ХФП стремится к максимальному значению при $P_1 \rightarrow 1$.

При оценке величины $\frac{\sigma_1^2(Ux)}{\mu_1^2(Ux)}$ повторно убеждаемся, что $P_1 \rightarrow 1$ при $\frac{\sigma_1^2(Ux)}{\mu_1^2(Ux)} \rightarrow 0$ (в большинстве из рассматриваемых случаев).

Для стимулов первого класса получили условие $\frac{\sigma_1^2(Ux)}{\mu_1^2(Ux)} \rightarrow 0$, при выполнении которого $XФП \rightarrow \max$, т.е. вероятность правильного распознавания для стимулов первого класса повышается.

Второй случай: предположим, что контрольный стимул $\xi_x \in \Omega_2$. Для стимулов ξ_j и ξ_r в рассматриваемом случае получим следующие вероятности.

- а) Если $\xi_j \in \Omega_2$ и $\xi_r \in \Omega_2$, то $P_{jrx} = P_{jx} = P_{rx} = P_2$
- б) Если $\xi_j \in \Omega_1$ и $\xi_r \in \Omega_2$, то $P_{jrx} = P_{12}$, $P_{jx} = P_{12}$, $P_{rx} = P_2$
- в) Если $\xi_j \in \Omega_2$ и $\xi_r \in \Omega_1$, то $P_{jrx} = P_{12}$, $P_{jx} = P_2$, $P_{rx} = P_{12}$
- г) Если $\xi_j \in \Omega_1$ и $\xi_r \in \Omega_1$, то $P_{jrx} = P_{12}$, $P_{jx} = P_{12}$, $P_{rx} = P_{12}$

Аналогично, вычисляя $\frac{\sigma_2^2(Ux)}{\mu_2^2(Ux)}$, для второго класса получим условие

правильного распознавания: $\frac{\sigma_2^2(Ux)}{\mu_2^2(Ux)} \rightarrow 0$.

Следовательно получили новое условие повышения правильности

распознавания для стимула i -ого класса : $\frac{\sigma_i^2(Ux)}{\mu_i^2(Ux)} \rightarrow 0$, ($i = 1, 2$).

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] *Пантелеев, С.В.* Разработка, исследование и применение нейросетевых алгоритмов, М.: 2001, 496 с.
- [2.] Нейронные сети. Matlab 6, Диалог-МИФИ. 2002, 496 с.
- [3.] *Барский А.Б.* Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений. М.: Финансы и статистика, 2004, 176 с.
- [4.] *Саркисян С.Г.* Определение вероятностных характеристик адаптивной распознающей системы. В сб. Всесоюз. Конф. "Адаптируемые средства программирования", Кишинев, 1990. СС. 46–51.
- [5.] Перцептрон-система распознавания образов, под ред. чл.-кор. А.Г. Ивахненко, Изд-во Наукова Думка, Киев, 1975, СС. 46–51, 426 с.

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ ПЛЕНОК ТЕЛЛУРИДА КАДМИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСНОГО ОСАЖДЕНИЯ

К.Э. Авджян, Л.А. Ахоян, В.А. Геворкян, Л.А. Матевосян

Аннотация

Данная статья посвящена получению тонких пленок теллурида кадмия методом лазерного импульсного осаждения при разных температурах подложки и исследованию оптических и структурных характеристик этих пленок. Электронно-дифракционные исследования показали, что пленки, полученные при комнатной температуре, имеют близкую к аморфной (слабо упорядоченную) структуру. Пленки же, полученные при температуре 250⁰С имеют более упорядоченную структуру, близкую к поликристаллической. На основании измерений спектров отражения и пропускания определены коэффициент поглощения и значения ширины запрещенной зоны пленок теллурида кадмия, полученных при разных температурах подложки.

Ключевые слова: теллурид кадмия, лазерное импульсное осаждение, тонкие пленки.

ԼԱԶԵՐԱՅԻՆ ԻՄՊՈՒԼՍԱՅԻՆ ՓՈՇԵՅՐՄԱՆ ԵՂԱՆԱԿՈՎ ՍՏԱՅՎԱԾ ԿԱԴՄԻՈՒՄԻ ՏԵԼՈՒՐԻԴԻ ԲԱՐԱԿ ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՈՒ ԿԱՌՈՒՅՎԱԾՔԱՅԻՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Կ.Է. Ավդյան, Լ.Ա. Հախոյան, Վ.Ա. Գևորգյան, Լ.Ա. Մաթևոսյան

Ամփոփում

Աշխատանքը նվիրված է լազերային իմպուլսային փոշեցրման եղանակով կադմիումի տելուրիդի բարակ թաղանթների ստացմանը և դրանց օպտիկական ու կառուցվածքային հատկությունների ուսումնասիրմանը: Էլեկտրոնային դիֆրակցիոն հետազոտությունները ցույց են տվել, որ սենյակային ջեր-

մաստիճանում ստացված թաղանթները ունեն ամորֆ (թույլ կարգավորված) կառուցվածք: Սակայն 250⁰C ջերմաստիճանում ստացված թաղանթները ունեն ավելի կարգավորված՝ բյուրեղականին մոտ կառուցվածք: Տակդիրների տարբեր ջերմաստիճաններում ստացված կադմիումի տելուրիդի բարակ թաղանթների անդրադարձման և բացթողման սպեկտրներից որոշվել են դրանց կլանման գործակիցը և արգելված գոտու լայնությունը:

Հիմնաբառեր՝ կադմիումի տելուրիդ, լազերային իմպուլսային փոշեցրում, բարակ թաղանթներ:

INVESTIGATION OF OPTICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF PULSE LASER DEPOSITED CADMIUM TELLURIDE THIN FILMS

K. Avjyan, L. Hakhoyan., V. Gevorgyan, L. Matevosyan

Summary

The work investigates the process of synthesis and the optical and structural properties of cadmium telluride thin films received by pulse laser deposition technique at different temperatures of the substrate. Electron diffraction studies showed that the films synthesized at room temperature have a structure close to an amorphous, weakly ordered one. The films synthesized at 250⁰C have a more ordered structure, close to polycrystalline. On the grounds of the measurement of reflection and transmission spectra, the absorption coefficient and the banned gap value of cadmium telluride films deposited at different substrate temperatures have been determined.

Keywords: cadmium telluride, pulse laser deposition, thin films.

Введение

Тонкопленочный теллурид кадмия (CdTe) в настоящее время рассматривается как один из наиболее перспективных полупроводниковых материалов для разработки эффективных и дешевых солнечных элементов. Солнечные элементы на основе CdTe имеют максимальный теоретический коэффициент полезного действия – свыше 29% [1]. Это обусловлено оптимальной для однопереходных солнечных элементов шириной запрещенной зоны теллурида кадмия $E_g = 1.45\text{эВ}$. Отличительной особенностью CdTe, как материала для солнечных элементов, является также большое значение коэффициента поглощения ($\sim 10^4\text{ см}^{-1}$). Это означает, что для создания базового поглощающего слоя достаточно использовать пленку CdTe толщиной от 2 до 6 мкм, что в 100 раз

тоньше, чем толщина монокристаллического кремниевого солнечного элемента. Природных запасов CdTe достаточно для широкомасштабного производства солнечных элементов. При этом CdTe обладает высокой устойчивостью к разложению, поэтому СЭ на основе теллурида кадмия в процессе эксплуатации не оказывают отрицательного воздействия на здоровье людей [2]. В настоящее время максимальная эффективность лабораторных образцов пленочных СЭ на основе CdTe с активной площадью 1см^2 составляет 16,5% [3]. Эти солнечные элементы получают путем сублимации в замкнутом объеме (CSS) при высоких температурах подложки (550°C – 650°C). Благодаря экономичности и радиационной стойкости пленочные СЭ на основе CdTe представляют альтернативу СЭ на основе моно-Si и GaAs при использовании не только в наземных, а и в заатмосферных условиях. Важной характеристикой для СЭ, используемых в заатмосферных условиях, является его мощность на единицу веса (приведенная мощность), поскольку ее величина определяет стоимость вывода на орбиту источника питания космического аппарата. В пленочных СЭ на основе CdTe замена стеклянной подложки на гибкую полиимидную подложку снижает вес СЭ на 98%. Пленочные гибкие СЭ представляют также и рыночный интерес и для наземного применения, так как могут легко монтироваться на поверхности разной формы.

CSS-технология неприменима для получения СЭ на гибких подложках, в качестве которых используются полиимидные пленки, допускающие нагрев до (400°C – 450°C). Для создания СЭ на гибких подложках необходимо применять низкотемпературные методы осаждения пленок CdTe. В качестве таких методов наиболее перспективными являются такие методы, как: метод магнетронного распыления и метод физического вакуумного испарения, например, метод импульсного лазерного испарения и метод термического испарения.

Целью данной работы является исследование оптических и структурных характеристик пленок теллурида кадмия, осажденных на стеклянные подложки методом лазерного импульсного испарения.

Методика эксперимента

Пленки CdTe осаждались на стеклянную подложку методом лазерного импульсного испарения. Блок-схема технологической установки лазерного импульсного испарения представлена на Рис.1. Процесс осаждения пленок проводился при давлении 2×10^{-5} мм рт. ст.. Используемое для осаждения пленок лазерное излучение имело следующие значения параметров: длину волны – 1.06 мкм, длительность импульсов

– 30 нс, энергию – 0.35 Дж, интенсивность в зоне облучения мишени $\sim 5 \times 10^8$ Вт/см², частоту следования испаряющих импульсов – 1 Гц. Перед процессом осаждения стеклянные подложки сначала обезжиривались в чистом ацетоне, затем промывались в УЗ ванне в растворе ПАВ-а. После этого подложки загружались в вакуумную камеру и перед процессом осаждения проводился отжиг подложек в течение 20–30 мин. при температуре 100°C и при давлении 2×10^{-5} мм рт. ст. Пленки CdTe осаждались при двух разных температурах подложки: при комнатной температуре (КТ) и при 250°C. Кристаллическая структура пленок исследовалась методом дифракции электронов высокой энергии в режиме отражения (ускоряющее напряжение – 75 кВ) на электронографе ЭМР-100М. Толщина пленок определялась интерферометрическим способом. Средняя толщина слоя CdTe, осаждаемого за один испаряющий импульс, определялась делением измеренной общей толщины пленки на число испаряющих лазерных импульсов. Измерения показали, что толщина осажденного за один испаряющий импульс слоя (при количестве импульсов равным 100) составляет 4.5 нм. Измерения коэффициентов пропускания (T) и отражения (R) полученных пленок проводились на спектрометре Filmetrics F20 в диапазоне длин волн 400–1000 нм.

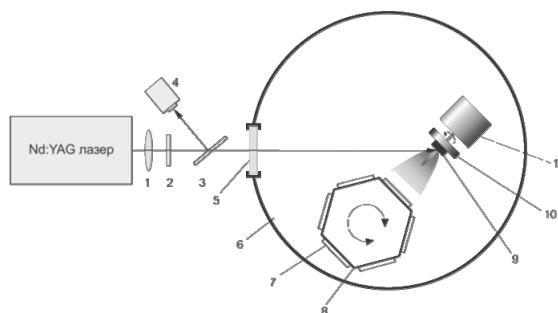


Рис. 1. Блок-схема лазерного импульсного испарения.

1.фокусирующая линза, 2. светофильтр, 3. кварцевое стекло, 4. калориметр, 5. кварцевое окно, 6. вакуумная камера, 7. подложка, 8. нагреваемый держатель подложек, 9. мишень, 10. вращающийся держатель мишени, 11. электродвигатель.

Результаты измерений

• Электронно-дифракционные измерения

Электронно-дифракционные исследования показали, что пленки, полученные при комнатной температуре (Рис. 2 а) имеют слабо упорядоченную, близкую к аморфной, структуру вне зависимости от их тол-

щины. Пленки же, полученные при температуре 250⁰С (Рис. 2 б), имеют более упорядоченную структуру, близкую к поликристаллической.

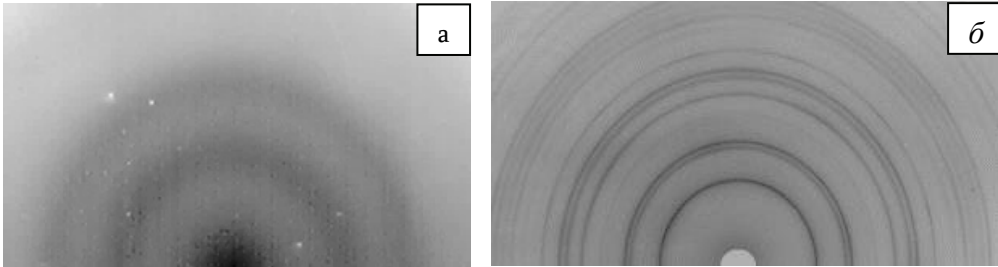


Рис. 2. Электронно-дифракционные картины от слоев CdTe с толщиной ~500 нм. Температура роста а) КТ, б) 250⁰ С (подложка-стекло).

• **Оптические измерения**

На Рис. 3 приведены результаты измерений спектральной зависимости коэффициентов пропускания (Т) и отражения (R) пленок CdTe, осажденных при КТ и при температуре 250⁰С.

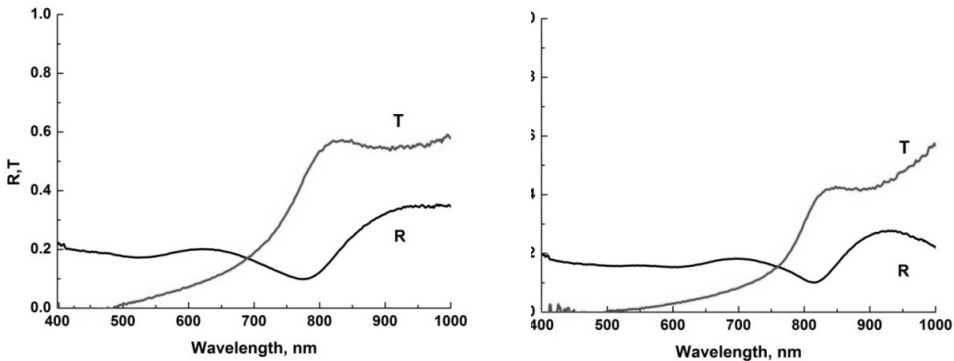


Рис. 3. Спектральные зависимости коэффициентов пропускания(Т) и отражения (R) пленок CdTe, осажденных при КТ (а) и при температуре 250⁰С (б).

На Рис. 4 приведены спектры поглощения А ($A = 1 - R - T$) пленок CdTe толщиной 500 нм, осажденных при КТ (1) и при температуре 250⁰С (2).

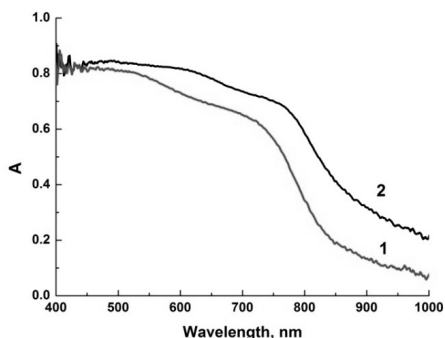


Рис. 4. Спектры поглощения A ($A = 1 - R - T$) пленок **CdTe** толщиной 500 нм, осажденных при КТ (1) и при температуре 250⁰С (2).

Как видно из рис. 4, заметное поглощение в пленках, полученных как при КТ, так и при температуре 250⁰С происходит при длинах волн меньше чем 850 нм, что соответствует краю фундаментального поглощения в монокристалле **CdTe**.

Край основного поглощения неупорядоченных полупроводниковых систем за счет образования «хвостов» плотности состояний с экспоненциальным убыванием плотности состояний вглубь запрещенной зоны, согласно эмпирическому закону Урбаха в длинноволновой области описывается коэффициент поглощения $\alpha = \alpha_0 \exp(\hbar\omega/E_u)$, где α_0 и E_u параметры Урбаха [4]. Для оценки степени неупорядоченности пленок **CdTe** на рис. 5 приведена зависимость $\ln(\alpha)$ от энергии фотона $\hbar\omega$ для пленок, полученных при КТ (кривая 1) и температуре 250⁰С (кривая 2). Коэффициент поглощения α на основании закона Бугера-Ламберта с учетом отражения от поверхности пленки и от задней стороны стеклянной подложки с постоянным коэффициентом отражения $R_{ст}=0,04$ вычислялся по формуле $\alpha=(1/d)*\ln(0.96(1-R)/T)$, где R и T измеренные значения, соответственно коэффициентов пропускания и отражения пленки **CdTe**, а d – толщина пленки.

Как видно из Рис. 5., кривая 1 хорошо аппроксимируется линейной зависимостью в области энергий 1.3–1.5 эВ. Вычисленный из этой зависимости параметр Урбаха («хвост» Урбаха) $E_u = 0.2$ эВ. Для пленки **CdTe**, осажденной при температуре 250⁰С (кривая 2), не наблюдается участка с линейной зависимостью $\ln(\alpha)$ от энергии фотона $\hbar\omega$. Этот результат, в соответствии с результатами электронно-дифракционных исследований, свидетельствует о том, что пленки, осажденные при температуре 250⁰С, имеют более упорядоченную структуру, чем пленки, осажденные при комнатной температуре.

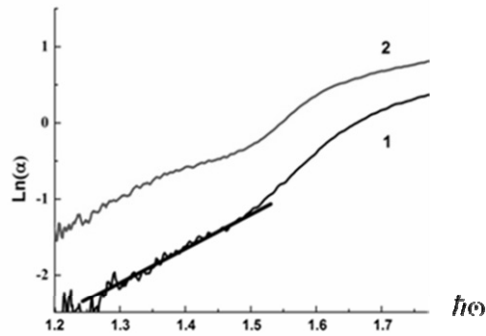


Рис. 5. Зависимость $\text{Ln}(\alpha)$ от энергии фотона для пленок **CdTe**, полученных при КТ (кривая 1) и температуре 250°C (кривая 2).

При прямых разрешенных переходах зависимость коэффициента поглощения от энергии фотона $\hbar\omega$ определяется по формуле $\alpha = (V/\hbar\omega) * (\hbar\omega - E_g)^{1/2}$. На рис. 6 а, б приведены зависимости $(\alpha \cdot \hbar\omega)^2$ от $\hbar\omega$ для пленок CdTe, полученных при комнатной температуре и температуре 250°C .

Как видно из рис. 6, линейные аппроксимации этих зависимостей пересекаются с осью $\hbar\omega$ при значениях 1.54эВ и 1.75эВ для пленки CdTe, осажденной при температуре подложки 250°C и, соответственно, 1.6эВ и 1.75эВ для пленки CdTe, осажденной при комнатной температуре подложки. Полученные значения близки к значениям для оптической ширины запрещенной зоны кристаллического CdTe 1.5эВ (переход $\Gamma_{8v} \rightarrow \Gamma_{6c}$) и 1.75эВ (переход $\Gamma_{7v} \rightarrow \Gamma_{6c}$) (Рис. 7), что свидетельствует о наличии зонной структуры даже для пленок CdTe, осажденных при комнатной температуре.

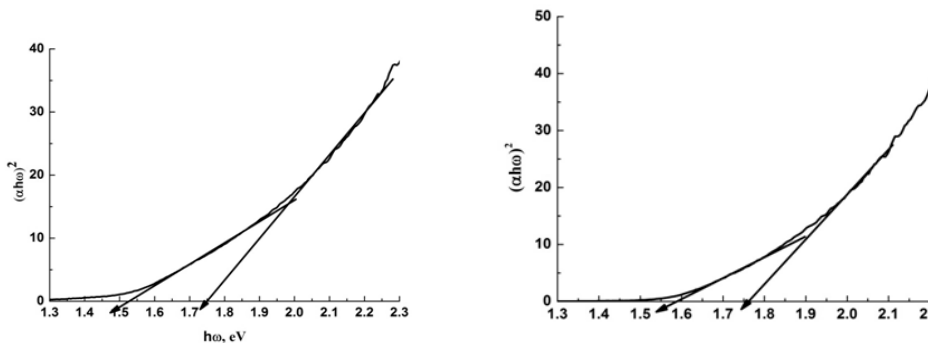


Рис. 6. Зависимость $(\alpha \hbar\omega)^2$ от $\hbar\omega$ для пленки CdTe, осажденной при температуре подложки 250°C (а) и комнатной температуре (б).

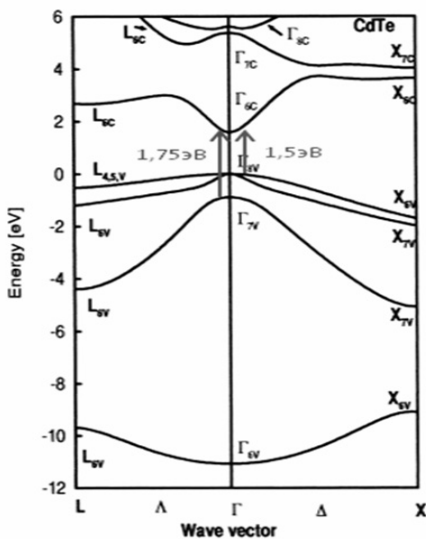


Рис. 7. Структура зон CdTe

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] *Sze S.M.* Physics of semiconductor devices (2nd edition), Wiley, Amsterdam (1981), Microelectronics Journal, vol. 13, no. 4, p. 44, 1982.
- [2.] *Fthenakis V., Fuhrmann V.M., Heiser M., Lanzirotti J. Fitts A. J. and W. Wang.* Progress in Photovoltaics Research and Applications, 13. PP. 713–723, 2005.
- [3.] *Bosio A., Romeo N., Mazzamuto S., Canevari V.* Polycrystalline CdTe thin films for photovoltaic applications. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, vol. 52, no. 4. PP. 247–279, 2006.
- [4.] *Bonch-Bruevich V.L.* Infrared Optical Transitions in the Disordered Semiconductors. Phys. Status Solidi, 42, 35, (1970).

САМОВОЗДЕЙСТВИЕ ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В ИОНИЗИРУЮЩЕЙСЯ СРЕДЕ: КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОМ ФАЗОВОЙ ПЛОСКОСТИ

О.В. Багдасарян, А.В. Дарьян, Т.М. Князян

hovik@seua.am, ara_daryan@yerphi.am, ktamara@seua.am

Аннотация

В данной статье исследовано самовоздействие плоской электромагнитной волны в нелинейной среде. Рассмотрение проведено на модели кубичной нелинейности ионизационного типа без конкретизации физических механизмов нелинейности. Исследование проведено методом фазовой плоскости, которое позволяет качественно описать все возможные решения нелинейного дифференциального уравнения Гельмгольца без проведения численного интегрирования. Показано явление самоограничения энергии прошедшей волны в среде, связанное с тем, что при росте амплитуды поля диэлектрическая проницаемость среды меняет знак от положительного к отрицательному.

Ключевые слова: электромагнитные волны, нелинейная среда, самовоздействие.

ԷԼԷԿՏՐԱՄԱԳՆԻՏԱԿԱՆ ՀԱՐԹ ԱԼԻՔԻ ԻՆՔՆԱՆԵՐԳՈՐԾՈՒՄԸ ԻՈՆԱՅՎՈՂ ՄԻՋԱՎԱՅՐՈՒՄ. ՈՐԱԿԱԿԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ ՓՈՒԼԱՅԻՆ ՀԱՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՂԱՆԱԿՈՎ

Հ.Վ. Բաղդասարյան, Ա.Վ. Դարյան, Տ.Մ. Կնյազյան

Ամփոփում

Աշխատանքում հետազոտված է ոչ գծային միզավայրում էլեկտրամագնիսական հարթ ալիքի ինքնաներգործումը: Դիտարկումը կատարված է իոնացվող միջավայրի համար առանց ոչ գծայնության ֆիզիկական մեխանիզմների կոնկրետացման՝ իոնիզացիոն տիպի խորանարդային ոչ գծայնության մոդելով: Հետազոտումը կատարված է փուլային հարթության եղանակով, որը թույլ է տալիս որակապես նկարագրել Հելմհոլցի ոչ գծային դիֆերենցիալ հավասարման բոլոր հնարավոր լուծումները չկատարելով թվային ինտեգրում: Յույց է տրված միջավայրում անցած ալիքի էներգիայի ինքնասահմանափակման երևույթը, որը պայմանավորված է նրանով, որ միջավայրի դիէլեկտրիկ

թափանցելիությունը դաշտի ամպլիտուդի աճի դեպքում դրականից նվազելով դառնում է բացասական:

Հիմնաբառեր՝ էլեկտրամագնիսական ալիք, ոչ գծային միջավայր, ինքնաներգործում:

SELF-ACTION OF PLANE ELECTROMAGNETIC WAVE IN IONIZING MEDIUM: QUALITATIVE ANALYSIS BY THE PHASE PLANE METHOD

H. Baghdasaryan, A. Daryan, T. Knyazyan

Summary

In the paper, self-action of plane electromagnetic wave in nonlinear medium is analysed. Consideration is performed on the model of ionizing type cubic nonlinearity without specification of physical mechanism of nonlinearity. The analysis is carried out by the phase plane method, which permits to describe qualitatively all possible solutions of Helmholtz's nonlinear differential equation without performing numerical integration. Phenomenon of self-limitation of transmitted wave power in the medium is shown related to the fact that at the growth of field amplitude permittivity of a medium changes its sign from positive to negative.

Keywords: electromagnetic wave, non-linear medium, self-action.

1. Введение

При распространении мощной электромагнитной (ЭМ) волны может наблюдаться изменение параметров среды. Если при изменении параметров среды от интенсивности волны не появляются новые частоты, то применяется термин «*самовоздействие волны*».

С нелинейными явлениями типа *самовоздействия волн* приходится сталкиваться в современной лазерной оптике, акустике, физике плазмы [1–3]. Нелинейные эффекты оказываются весьма существенными и при распространении мощных радиоволн в ионосфере [4]. В современной физике волновых процессов нелинейные волны играют не менее важную роль, нежели нелинейные колебания в физике колебаний. Именно при исследовании самовоздействия нелинейная оптика столкнулась с проявлением сильных нелинейных эффектов – временной и пространственной бистабильностью, генерацией структур, оптической турбулентностью – генерацией световых полей, не имеющих даже отдаленных аналогов в линейной оптике.

Одним из физических механизмов самовоздействия ЭМ волны является ионизация газа под действием мощной электромагнитной волны, так называемая ионизационная нелинейность. Начальная диэлектрическая проницаемость газа положительна, $\varepsilon > 0$ и уменьшается под действием волны. С увеличением мощности волны ионизация растёт и диэлектрическая проницаемость становится отрицательной, что приводит к качественному изменению условий распространения волны. Эффект ионизации газа под действием мощной волны применяется в антенных переключателях импульсных РЛС при использовании общей антенны для передачи мощного импульса и приема отраженных от целей слабых сигналов. Резонансный волноводный газовый разрядник, – отражающий выключатель, – представляет собой герметичный отрезок прямоугольного волновода, заполненный смесью паров воды с аргоном или водородом при низком давлении ($10^2 - 10^4$ Па). Переключение разрядника на отражение сигнала происходит автоматически под действием мощного сигнала передатчика [5].

2. Метод единого выражения

В настоящей работе анализ самовоздействия плоской ЭМ волны проводится методом единого выражения (МЕВ), который удобен как для численного счета [6], так и для качественного анализа методом фазовой плоскости [7, 8].

В МЕВ общее решение уравнения Гельмгольца для компонентов электрического поля ищут в виде [6]:

$$E_x(z) = U(z) \exp[-iS(z)] \quad (1)$$

Здесь $U(z)$ и, соответственно, амплитуда и фаза ЭМ волны. Самовоздействие означает, что диэлектрическая проницаемость среды зависит от интенсивности волны в данной точке. При отсутствии потерь или усиления диэлектрическая проницаемость среды – действительная величина.

Поиск решения уравнения Гельмгольца в виде (1) впервые был предложен в работах [9, 10] и далее развивался в ряде работ [6, 11, 12]. Подставляя (1) в уравнение Гельмгольца, получаем систему дифференциальных уравнений относительно $U(z)$ и $S(z)$:

$$\frac{dU}{dk_0 z} = Y, \quad \frac{dU}{dk_0 z} = \frac{Pz - \varepsilon(U)U^2}{U^2}, \quad (2)$$

где
$$P = U^2 \frac{dS}{dk_0 z} \quad (3)$$

Величина P – константа, пропорциональная среднему потоку энергии в среде [9, 10]. Соотношение (3) описывает сохранение потока энергии вдоль оси z в средах без потерь или усиления.

Для описания самовоздействия волны в среде мы конкретизируем вид нелинейности, а именно: принимаем модель кубичной нелинейности ионизационного типа [6, 11, 12]. Это означает, что зависимость диэлектрической проницаемости от амплитуды поля имеет вид:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_2 U^2, \quad (4)$$

где ε_0 – начальная диэлектрическая проницаемость, а ε_2 – параметр нелинейности среды, причём $\varepsilon_0 > 0$, $\varepsilon_2 < 0$. При $\varepsilon_2 = 0$ среда линейна.

3. Анализ фазовых портретов

Для получения фазовых траекторий необходимо из системы (2) исключить координату z , что формально можно проделать делением второго уравнения на первое:

$$\frac{dY}{dU} = \frac{P^2 - \varepsilon(U)U^4}{U^2 Y}. \quad (5)$$

Полученное выражение известно как уравнение изоклин [13]. Интегрируя полученное выражение с учетом (4), получаем уравнение фазовых траекторий $Y(U)$:

$$Y^2 + \frac{P^2}{U^2} + \varepsilon_0 U^2 + \varepsilon_2 \frac{U^4}{2} = C, \quad (6)$$

где C – константа интегрирования, определяющая конкретную траекторию на фазовом портрете. Константа C имеет размерность плотности электромагнитной энергии [8].

Координаты (U_S, Y_S) особых точек фазового портрета, то есть точек, в которых

Formula

направление касательной к фазовой траектории не определено [13], определяются из условия:

$$\frac{dU}{dz} = 0, \frac{dY}{dz} = 0.$$

В нашем случае, учитывая (2) для координат особых точек, получаем систему уравнений:

$$P^2 - \varepsilon_0 U_S^4 - \varepsilon_2 U_S^6 = C, Y_S = 0. (7)$$

В Таблице 1. указаны координаты, число и типы особых точек, вычисленные по (7), а также значения диэлектрической проницаемости в особой точке, вычисленные по (4). В таблице введены следующие

$$\alpha = \sqrt{-\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_2}}, \beta = \sqrt{-\frac{2\varepsilon_0}{3\varepsilon_2}}, \gamma = \sqrt{\frac{\varepsilon_0^2}{3\varepsilon_2}}$$

обозначения: A и B – положительные решения уравнения (7).

Таблица 1.

№	Поток	Особые точки			$\varepsilon(U_S)$
		Координаты	число	тип	
1	$P=0$	$U_S=0, Y_S=0$	1	центр	$\varepsilon=\varepsilon_0$
		$U_S=\pm\alpha, Y_S=0$	2	седло	$\varepsilon=0$
2	$P<\gamma$	$U_S=\pm A, Y_S=0$	2	центр	$0<\varepsilon<\varepsilon_0$
		$U_S=\pm B, Y_S=0$		седло	$0<\varepsilon<\varepsilon_0$
3	$P=\gamma$	$U_S=\pm\beta, Y_S=0$	2	центр-седло	$\varepsilon=\varepsilon_0/3$
4	$P>\gamma$	-----	0	-----	-----

Каждому случаю, указанному в Таблице 1., соответствует определённый тип фазового портрета. Фазовые портреты для всех случаев легко строятся в соответствии с (5). В результате получаем многообразие фазовых портретов, изображённых на Рис.1 и Рис. 2а, б, в.

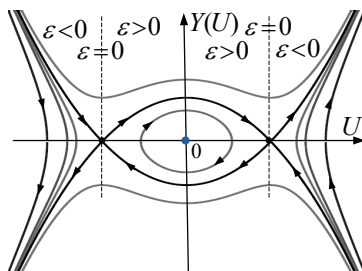


Рис.1. Фазовый портрет системы (2) при $P=0$

В случае $\varepsilon_0 > 0, \varepsilon_2 < 0$ возможны четыре типа фазового портрета в зависимости от значения P . Фазовые траектории при отсутствии потока энергии в среде ($P=0$) описывают стоячие волны (Рис.1), которые при малых амплитудах поля аналогичны фазовым траекториям стоячих волн в линейной среде. Сепаратрисы охватывают замкнутые траектории и смыкаются в особых точках типа «седло». Любому отрезку сепаратрисы и смыкаются в особых точках типа «седло».

ратрисы, включающему особую точку, соответствуют синхронные колебания с асимптотически (при $\varepsilon \rightarrow \pm\infty$) постоянной конечной амплитудой.

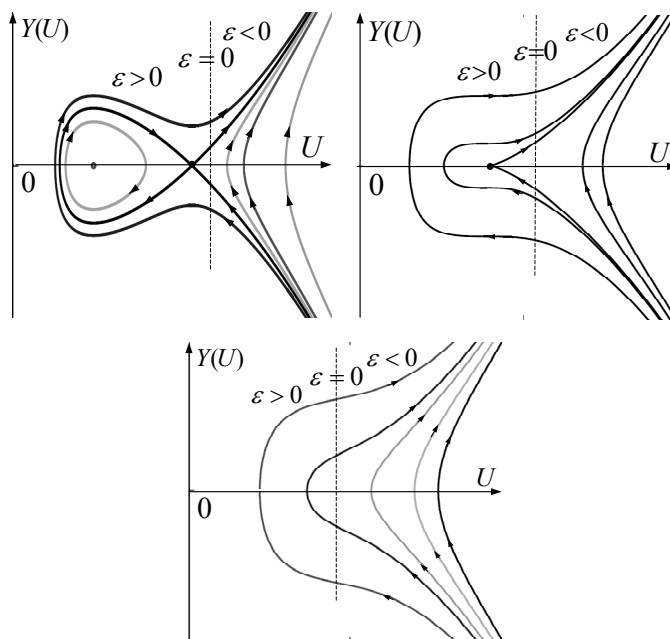


Рис. 2. Фазовые портреты системы (2) при а) $0 < P < \gamma$, б) $P = \gamma$, в) $P > \gamma$

При малых потоках, $0 < P < \gamma$ может наблюдаться как периодическое, так и аperiodическое распределение амплитуды поля (Рис. 2а). Особая точка типа «центр» описывает бегущую, а типа «седло» – асимптотически бегущую волны.

При $P = \gamma$ (наблюдается только аperiodическое распределение поля (Рис. 2б), причем вследствие слияния двух особых точек образуется особая точка типа «центр-седло»). Все траектории могут реализоваться только в ограниченной области физического пространства. Исключение составляют отрезки сепаратрисы, включающие особую точку, которая описывает поведение поля на бесконечности. Это значение потока энергии является максимальным, которое может проникать в среду с ионизационной нелинейностью.

При потоках $P > \gamma$ (особых точек нет (Рис. 2в) и, соответственно, нет фазовых траекторий, реализуемых в неограниченной области физического пространства. Отсюда следует, что при падении волны на нелинейное полупространство происходит самоограничение потока энергии значением $P = \gamma$. Данное явление было исследовано ранее прямым численным интегрированием системы (2) [6].

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] *Boyd R.* Nonlinear Optics, Academic Press, 2003.
- [2.] Нелинейная акустика в задачах и примерах. О.В. Руденко, С.Н. Гурбатов, К.М. Хедберг Изд. МГУ, 1990.
- [3.] *Цытович В.* Нелинейные эффекты в плазме, Изд-во Ленанд, 2014.
- [4.] *Гинзбург В.Л.* Распространение электромагнитных волн в плазме, Изд-во Наука, М. 1967.
- [5.] Резонансные разрядники антенных переключателей, Под ред. И.В. Лебедева, М. Сов.Радио, 1976.
- [6.] *Baghdasaryan H.V.* Basics of the Method of Single Expression: New Approach for Solving Boundary Problems in Classical Electrodynamics. Monograph: Chartaraget, Yerevan, 164 pages, 2013.
- [7.] *Багдасарян О.В., Пермяков В.А.* Ветвление режимов и эффект ограничения потока энергии ТЕ-волны в среде с ионизационной нелинейностью. // Изв. Вузов. Радиофизика Т21, №9. СС.1352–1362, 1978.
- [8.] *Багдасарян О.В., Дарьян А.В.* Метод фазовой плоскости в теории распространения электромагнитных волн // Межвуз. темат. сб. науч. трудов по радиотехнике. / ЕрПИИ. СС. 64–74. 1988.
- [9.] *Силин В.П.* Нелинейная теория проникновения высокочастотного поля в проводник // ЖЭТФ.-Т 53, Вып.5 (11). СС. 1662–1677. 1967.
- [10.] *Басс Ф.Г., Вербицкий И.Л., Гуревич Ю.Г.* К теории распространения электромагнитных волн в нелинейных средах. // Изв. Вузов. Радиофизика. Т. 11, № 10. СС. 1480–1489. 1968.
- [11.] *Baghdasaryan H.V., Daryan A.V., Knyazyan T.M., Nikolaos K.Uzunoglu.* Modelling of nonlinear enhanced performance Fabry-Perot interferometer filter, *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 14, no.2. PP. 105–108, 1997.
- [12.] *Baghdasaryan H.V., Knyazyan T.M.* Problem of Plane EM Wave Self-action in Multilayer Structure: an Exact Solution, *Optical and Quantum Electronics*, vol. 31, no.9/10. PP.1059–1072. 1999.
- [13.] *Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э.* Теория колебаний М.: Наука, 1981. 568 с.

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИЙ SMS

Д.А. Геворкян, А.С. Нанасян

Аннотация

В данной статье рассмотрены особенности построения систем, предназначенных для мониторинга и управления несложными технологическими установками и процессами, которые основаны на использовании технологий SMS. Обсуждаются факторы, ограничивающие область применения технологий SMS в дистанционных системах мониторинга и управления.

Ключевые слова: sms мониторинг, gsm управление, gsm контроллер.

SMS ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՆԵՐԻ ՎՐԱ ՀԻՄՆՎԱԾ ՀԵՌԱՀԱՐ ԳԻՏԱՐԿՄԱՆ ԵՎ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՅՈՒՐԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Դ.Ա. Գևորգյան, Ա.Ս. Նանասյան

Ամփոփում

Նկարագրված են SMS տեխնոլոգիաների վրա հիմնված հեռահար մոնիթորինգի և կառավարման համակարգերի յուրահատկությունները, որոնք նախատեսված են ոչ բարդ տեխնոլոգիական սարքավորումների և գործընթացների համար: Բննարկվում են այն գործոնները, որոնք սահմանափակում են նշված համակարգերի օգտագործումը:

Հիմնաբառեր` sms դիտարկում, gsm կոնտրոլեր, sms կառավարում:

FEATURES OF CONSTRUCTION OF REMOTE MONITORING AND CONTROL SYSTEMS BASED ON SMS TECHNOLOGIES

D. Gevorkyan, A. Nanassian

Summary

Peculiarities of the system construction are analyzed which aim at remote monitoring and control of simple technological facilities and processes based on

SMS technology usage. The factors restricting the sphere of SMS technologies' usage in the remote systems of monitoring and control are discussed.

Keywords: sms monitoring, gsm controller, sms control.

Получившая массовое распространение «услуга коротких сообщений» – SMS, наряду с основным предназначением – обмена короткими тестовыми сообщениями по телефону между абонентами сотовых сетей, стала основой широкого спектра разнообразных инфокоммуникационных систем, таких, как службы массовых рассылок, Websms, почтовые информаторы и др. Менее распространены SMS-системы, предназначенные для дистанционного мониторинга и управления несложными технологическими установками и процессами [1]. Подобные системы привлекательны своей простотой и дешевизной, но имеют ряд ограничений, обусловленных спецификой GSM технологий.

Эти ограничения, в первую очередь, касаются неизбежных временных задержек при передаче SMS, что делает невозможным (или существенно сужает область применения) использование подобных технологий в системах реального времени. В качестве окончательных устройств в подобных системах чаще используются многоканальные GSM контроллеры, обеспечивающие взаимодействие с сотовой сетью и с объектом управления. Следует отметить, что доступные на рынке GSM контроллеры обычно имеют не более восьми каналов управления, что, в свою очередь, ограничивает число контролируемых узлов объекта мониторинга и управления [2]. Управляющие коды, содержащиеся в SMS, направляемой с сотового телефона или специализированного SMS сервера в GSM контроллер, активируют заданный канал (или заданную группу каналов), включая / выключая необходимое технологическое электрооборудование. Информация о текущем состоянии элементов объекта управления может быть получена на телефон / сервер с датчиков, подключенных к каналам GSM контроллера, которые отражают только качественную статусную информацию (включено/выключено, открыто/закрыто, больше/меньше и т.п.), что, в свою очередь также ограничивает область применения подобных систем.

Тем не менее, для дистанционного мониторинга и управления большинством несложных технологических систем, не требующих немедленного информационного и/или управляющего отклика, равно как и количественной информации о состоянии объекта управления, использование систем SMS мониторинга и управления является наиболее простым, эффективным решением. Рассмотрим два возможных варианта построения SMS системы мониторинга и управления: первый вариант – непосредственное взаимодействие с GSM контроллером объекта

мониторинга посредством мобильного телефона; второй возможный вариант – включение в цепочку «оператор – объект управления» специализированного SMS сервера со шлюзом (GSM модемом) в сотовую сеть. Подобный вариант имеет очевидные преимущества, поскольку позволяет:

- Создавать интеллектуальные системы управления, способные генерировать самостоятельные, без вмешательства оператора, управляющие воздействия на объект управления по информации от сенсоров объекта и/ или по заданным алгоритмам управления. При этом полная или выборочная информация о процессах может быть направлена оператору в виде sms сообщений и/или отображаться в виде web страницы (если предусмотрен доступ sms - сервера в Интернет).

- Одновременное подключение sms-сервера к GSM и IP-сетям позволяет осуществлять отдаленный доступ к управляемому объекту также и вне зоны покрытия сотовой сети (не прибегая к механизмам роуминга) из любой точки, где функционирует Интернет, равно как и возможность создания активной web- страницы системы. Наличие активной web-страницы позволяет представлять оператору обобщенную текущую информацию о состоянии контролируемых элементов объекта мониторинга и, при необходимости, непосредственно с сервера управлять состоянием контролируемых каналов.

- При наличии в составе оборудования контролируемых объектов вычислительных средств или интеллектуальных контроллеров, взаимодействующих с IP сетями (серверы, маршрутизаторы, шлюзы), возможно построение комбинированных систем контроля, когда факт работоспособности подобного оборудования определяется применением известных сетевых технологий (например, PING), а получение информации о состоянии объекта и управление осуществляется механизмами SMS [3]. Как уже отмечалось, один из факторов, ограничивающих использование систем мониторинга и управления на основе sms-технологий – временные задержки в реакции системы на управляющие команды, определяемые спецификой GSM-технологий. При проектировании управляющих систем на базе sms- технологий представляют практический интерес значения реальных вероятных задержек в конкретных сотвых сетях, в которых предполагается использовать проектируемую систему. Естественно, измеренные значения задержек могут носить только оценочный характер. Ниже приводятся результаты подобных измерений для сотвых сетей Армении. Отметим еще раз, что приведенные данные могут рассматриваться только как ориентировочные, вероятные значения и не могут быть приняты в качестве исходных данных при проектировании систем мониторинга и управления, критичных к превышающим допустимое время задержкам в получении статусной

информации или исполнении управляющих sms- команд. Отметим также, что нельзя исключить последствия возможных пиковых нагрузок на сотовую сеть, при которых задержки в передаче sms- команд могут существенно превысить среднюю прогнозируемую величину. Поэтому в ответственных приложениях должны быть предусмотрены механизмы текущего контроля установленной величины допустимого лимита задержки, и при превышении их значений приняты меры по извещению операторов системы управления об экстремальной ситуации. Таким образом, область применения технологий sms в дистанционных системах мониторинга и управления ограничивается:

- величиной допустимых задержек в исполнении управляющих sms-команд и статусной информации;
- возможным, лимитированным числом управляющих/информационных каналов;
- возможным использованием только двоичных сенсоров, определяющих граничные движения, пожарных датчиков, max/min температурных датчиков, уровня жидкости и состояния исполнительных устройств или max/min датчиков (например, датчиков и т.п.).

Ниже (Рис.1, Рис. 2) приводятся результаты измерений задержек при передаче sms в сотовых сетях Армении. С достаточной достоверностью можно оценить вероятную среднюю задержку в сотовых сетях в исполнении sms-команд (результаты аналогичных измерений в других, функционирующих в Армении сетях сотовой связи, существенно не отличаются от приведённых выше) в 35–40 сек.

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] GSMControl – управление с помощью SMS сообщений
<http://media.klinkmann.ru/pdf/ru/m2m/GSM%20control%20ru%200708.pdf>
- [2.] GSM контроллеры, GSM реле <http://www.smartron.ru/katalog/gsm-ustrojstva>
- [3.] *Геворкян Д., Нанасян А., Петросян А., Прохоренко Е., Хачатурян К., Аракелян В.* Функциональные особенности оперативной системы контроля и перезапуска базовых узлов компьютерной сети ASNET.AM. Материалы конференции CSIT. 2013. Ер., 2013.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВКЛАДА СПОНТАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВЫХОДНУЮ МОЩНОСТЬ ОНДУЛЯТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА

С.Г. Оганесян

sogan@freenet.am

Аннотация

В настоящей статье предложена теоретическая модель, позволившая получить точное выражение для средней выходной мощности ондуляторного генератора в стационарном режиме с учетом спонтанного и вынужденного излучений пучка электронов, эффекта насыщения и условия стационарности. Показано, что для реальных параметров пучков электронов и зеркал вклад спонтанного излучения доминирует.

Ключевые слова: лазер, стационарный режим, спонтанное излучение.

ՄՊՈՆՏԱՆ ԱՂՄՈՒԿԻ ՆԵՐԳՐՈՒՄԸ ՕՆԴՈՒԼՅԱՏՈՐԱՅԻՆ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐԻ ԵԼՔԱՅԻՆ ՀՉՈՐՈՒԹՅԱՆ ՄԵՉ

Ս.Գ. Հովհաննիսյան

Ամփոփում

Օնդուլյատորային գեներատորի ելքային հզորություն ճշգրիտ բանաձևը ստացիոնար ռեժիմում ստացված է առաջարկված տեսական մոդելի հիման վրա: Հետազոտումը կատարված է հաշվի առնելով էլեկտրոնների սպոնտան և ստիպողական ճառագայթումը, հագեցման երևույթը և ստացիոնար ռեժիմի պայմանը: Պարզված է, որ ռեալ էլեկտրոնների փնջերի և հայելիների համար սպոնտան ճառագայթման ներդրումը գերակշռում է:

Հիմնաբառեր` լազեր, ստացիոնար ռեժիմ, սպոնտան ճառագայթում:

STUDY OF SPONTANEOUS NOISE CONTRIBUTION TO THE OUTPUT OF AN UNDULATOR OSCILLATOR

S. Oganesyanyan

Summary

An exact expression for the undulator oscillator mean output in a steady-state regime is derived on the basis of the proposed theoretical model. Spontaneous and stimulated emissions of electrons as well as saturation effect and stationarity condition are taken into account. It is demonstrated that for real electron beams and mirrors the spontaneous radiation contribution dominates.

Keywords: laser, steady-state regime, spontaneous radiation.

1. Излучение ансамбля свободных (или связанных в молекулах) электронов в поле монохроматической волны, захваченной в плоский резонатор, может происходить по различным каналам, два из которых наиболее интересны с экспериментальной точки зрения. Во-первых, это вынужденное излучение или поглощение фотонов, параметры которых полностью совпадают с характеристиками фотонов этой волны. Во-вторых, это спонтанное излучение, отличающееся от исходного по частоте, фазе или поляризации. Первый процесс позволяет усиливать исходную волну, если у нас: а) имеется реальный источник исходного сигнала и б) процесс излучения доминирует над процессом поглощения. Что касается второго канала, то он является источником шума, нарушающим степень когерентности усиливаемой волны. В результате, амплитуда, частота и фаза выходного излучения становятся случайными функциями. Это означает, что все параметры выходного излучения испытывают флуктуации, а его спектр расширяется. В работах [1–3] мы рассмотрели проблему спонтанного шума, используя квазиклассическое приближение. Оно основано на квантовом описании движения электрона (уравнение Клейна-Гордона) и классическом описании поля излучения (уравнения Максвелла). Основная трудность при работе в рамках этого приближения заключается в том, что уравнения классической квантовой механики не позволяют прямо описать процесс спонтанного излучения фотона электроном. Поэтому необходимы какие-то дополнительные предположения. Одно из них рассмотрено в [4]. В наших работах [1–3] мы использовали подход, развитый в монографии [5], где ток, ответственный за спонтанное излучение электрона, связывается с флуктуациями его матрицы плотности. В рамках классического описания

амплитуда и фаза электромагнитной волны являются одновременно измеримыми величинами. Это позволило сначала из условия стационарности получить явное выражение для амплитуды лазерного излучения в стационарном режиме, а затем, введя в уравнения Максвелла шумовой ток, исследовать флуктуации частоты, фазы, амплитуды и выходной мощности ондуляторного генератора. Отметим, что эти исследования выполнены пока в случае, когда шумовой ток, а, следовательно, и флуктуации малы. Ясно, что классическое описание излучения справедливо лишь в случае, когда имеется достаточно большое число фотонов. Но оно не пригодно для исследования начального этапа работы генератора, стартующего из фотонного вакуума. Для последовательного описания всех стадий работы генератора более подходящим является аппарат квантовой электродинамики. Операторное представление электромагнитного поля позволяет автоматически учесть спонтанные эффекты без дополнительных предположений. Аппарат квантовой электродинамики применяется либо в представлении Шредингера, либо в представлении Гайзенберга. Первый подход удобен для составления балансных уравнений, однако при этом теряется информация о фазовых соотношениях. Эту проблему можно рассмотреть в рамках представления Гайзенберга. В работах [6–7] мы применили первый подход и исследовали среднюю выходную мощность генератора в случае непрерывного однородного пучка электронов. В [6] рассмотрена начальная стадия работы ондуляторного генератора, стартующего из фотонного вакуума, когда можно пренебречь изменениями параметров пучка электронов.

Установлено, что на этом этапе над порогом происходит сначала линейный, а затем экспоненциальный рост мощности выходного излучения во времени, т.е. формирование лазерного излучения из спонтанного шума пучка электронов. В [7] сформулирована система скоростных балансных уравнений как для пучка фотонов, так и пучка электронов. Показано, что при учете эффекта насыщения экспоненциальный рост выходной мощности генератора прекращается и в нем может установиться стационарный режим. Отметим, что при квантовании электромагнитного поля его амплитуда и фаза становятся операторами, которые не коммутируют друг с другом. Это означает, что они одновременно не могут иметь вполне определенные значения. Теоретически возможны три варианта: электромагнитное поле имеет а) определенное число фотонов и неопределенную фазу, б) определенную фазу и неопределенное число фотонов и г) определенное среднее число фотонов и определенную среднюю фазу. В [7] мы ограничились рассмотрением только первого случая и получили формулу для средней выходной мощности генератора, а также рассмотрели предельный случай, когда вклад спонтанного излучения просто мал. В настоящей работе мы про-

должны эти исследования, но уже для реальных параметров пучка электронов и зеркал. Отметим, что в случае, когда речь идет лишь о подсчете среднего числа фотонов в резонаторе в стационарном режиме, возникает вопрос, какую их долю следует считать спонтанным шумом. В настоящей работе выделена та часть выходной мощности, которая является результатом условия стационарности (по аналогии с результатом квазиклассического анализа в стационарном режиме), а оставшаяся мощность интерпретируется как спонтанный шум пучка электронов.

2. Генератор состоит из пучка электронов, магнитного ондулятора и плоского резонатора. Пусть все электроны движутся вдоль оси резонатора z , его длина равна L , а объем $-V_{res}$. Примем, что плотность пучка n_e невелика, а его разброс Δ по энергиям ε имеет гауссов вид $g_G(\varepsilon)$, ε_m и v_m – средняя энергия и скорость электронов. Пусть длина ондулятора L , а проекции его векторного потенциала $\vec{A}^{(u)}(z)$ на оси x и y равны $A_x^{(u)} = A_u \cos k_u z$ и $A_y^{(u)} = A_u \sin k_u z$. Примем, что резонатор состоит из двух зеркал, выполненных в виде плоских бесконечных идеально проводящих пластин. Переход к реальным полупрозрачным зеркалам осуществляется модификацией уравнения баланса для числа фотонов. Ограничимся исследованием только одной r -ой моды резонатора, электрическое поле которого

$$E_{r,x}(z,t) = E_r \sin(\omega_r t + \varphi_r) \sin k_r z.$$

Здесь $k_r = r\pi/L$, целое число $r = 1, 2, \dots$. Электроны, излучающие или поглощающие фотоны r -ой моды, имеют энергии $\varepsilon_{1,2} = \varepsilon_{cl} \pm 0,5\hbar\omega_r$, где $\varepsilon_{cl} = mc^2 / \sqrt{1 - \beta_{cl}^2}$ и $\beta_{cl} = 1/(1 + k_u/k_r)$.

3. В работе [7] сформулирована система дифференциальных скоростных уравнений первого порядка, описывающих изменение во времени средних чисел активных электронов $\bar{N}_{1,2}(t)$ и среднего числа фотонов $\bar{N}_{r,ph}(t)$ в резонаторе. При $\bar{N}_{1,2} \ll 1$ и в стационарном режиме она сводится к трем алгебраическим уравнениям:

$$(G - \alpha_{mr})\bar{N}_{r,ph} + Q = 0, \quad (1)$$

$$\tau_a^{-1}(\bar{N}_1^{(0)} - \bar{N}_1) - (\bar{N}_1 w_{1 \rightarrow 2}^{(0ph)} - \bar{N}_2 w_{2 \rightarrow 1}^{(1ph)})\bar{N}_{r,ph} - \bar{N}_1 w_{1 \rightarrow 2}^{(0ph)} = 0, \quad (2)$$

$$\tau_a^{-1}(\bar{N}_2^{(0)} - \bar{N}_2) + (\bar{N}_1 w_{1 \rightarrow 2}^{(0ph)} - \bar{N}_2 w_{2 \rightarrow 1}^{(1ph)})\bar{N}_{r,ph} + \bar{N}_1 w_{1 \rightarrow 2}^{(0ph)} = 0, \quad (3)$$

где $G = \bar{N}_1 w_{1 \rightarrow 2}^{(0ph)} - \bar{N}_2 w_{2 \rightarrow 1}^{(1ph)}$ и $Q = \bar{N}_1 w_{1 \rightarrow 2}^{(0ph)}$ – коэффициент усиления и скорость спонтанного излучения электронов с учетом эффекта насыщения. Условные вероятности

$$w_{1 \rightarrow 2}^{(0ph)}, w_{2 \rightarrow 1}^{(1ph)} \approx w_{spont}^{1mode} = 0,5\pi^2 r_0 (c^2 mc^2 / V_{res} \hbar \omega_r^2) K_u^2 \varepsilon_m \beta_m^2 (L / 2\pi \hbar v_m),$$

где учтено, что $\varepsilon_{cl} \cong \varepsilon_m$, $r_0 = e^2 / mc^2$, $\tau_a = L / v_m$, $K_u^2 = (eA_u / mc^2)^2$, $-e$ и m – заряд и масса электрона, $\alpha_{mr} = c |\ln R_2| / 2L$, где R_2 – коэффициент отражения интенсивности излучения на втором зеркале. Выходная мощность генератора

$$\bar{P}_{r,out} = \hbar \omega_r \alpha_{mr} \bar{N}_{r,ph}. \quad (4)$$

4. Рассчитаем $\bar{N}_{1,2}$ из (2-3), а затем G и Q . Подставив их в (1), получаем

$$\bar{N}_{r,ph}^2 (\alpha_{mr} / N_{r,ph}^{(sat)}) - \bar{N}_{r,ph} [G_0 - \alpha_{mr} (1 + \tau_a w_{1 \rightarrow 2}^{(0ph)})] - Q_0 = 0. \quad (5)$$

Здесь $Q_0 = w_{1 \rightarrow 2}^{(0ph)} \bar{N}_1^{(0)}$ и $G_0 = w_{1 \rightarrow 2}^{(0ph)} \bar{N}_1^{(0)} - w_{2 \rightarrow 1}^{(1ph)} \bar{N}_2^{(0)}$ – скорость спонтанного излучения пучка электронов и коэффициент усиления генератора без учета эффекта насыщения, $N_{r,ph}^{(sat)} \cong 1 / 2\tau_a w_{spont}^{1mode}$ – насыщающее число фотонов. В рамках развиваемой теории величина $N_{r,ph}^{(sat)} \gg 1$.

5. Если опустить слагаемые Q_0 и $\tau_a w_{1 \rightarrow 2}^{(0ph)}$ в уравнении (5), то оно переходит в обычное условие стационарности $G_0 / (1 + \bar{N}_{r,ph} / N_{r,ph}^{(sat)}) - \alpha_{mr} = 0$ с учетом эффекта насыщения. Его решение $\bar{N}_{r,ph} = \bar{N}'_{r,ph} = N_{r,ph}^{(sat)} (G_0 - \alpha_{mr}) / \alpha_{mr}$ не зависит ни от начальных условий, ни от спонтанного шума электронов. Если выполняется неравенство $G_0 \gg \alpha_{mr}$, то $\bar{N}'_{r,ph} = N_{r,ph}^{(sat)} G_0 / \alpha_{mr}$ и выходная мощность генератора $\bar{P}'_{r,out} = \hbar \omega_r N_{r,ph}^{(sat)} G_0$. 6. Приведем теперь точное решение квадратного уравнения (5). Учитывая, что $N_{r,ph}^{(sat)} \gg 1$ и $\bar{N}_{r,ph} > 0$, получаем

$$\bar{N}_{r,ph} = (N_{r,ph}^{(sat)} / 2\alpha_{mr}) \cdot \left[G_0 - \alpha_{mr} + \sqrt{(G_0 - \alpha_{mr})^2 + 4\alpha_{mr} Q_0 / N_{r,ph}^{(sat)}} \right]. \quad (6)$$

Для оценки относительного вклада спонтанного излучения в работу генератора удобно ввести параметр

$$\Theta = 4\alpha_{mr} Q_0 / N_{r,ph}^{(sat)} (G_0 - \alpha_{mr})^2. \quad (7)$$

В результате формула (6) преобразуется к виду

$\bar{N}_{r,ph} = \bar{N}'_{r,ph} \cdot [1 + (\sqrt{1 + \Theta} - 1) / 2]$. Если $\Theta = 0$, то мы возвращаемся к прежнему результату $\bar{N}_{r,ph} = \bar{N}'_{r,ph}$. Если $\Theta \ll 1$, то мы получаем результат работы [7].

7. Исследуем каково возможное минимальное значение $\Theta = \Theta_{\min}$ в случае реальных параметров генератора, работающего в оптимальном режиме. Из (7) следует, что необходимо потребовать $G_0 \gg \alpha_{mr}$. Теперь $\Theta_{\min} = 4Q_0\alpha_{mr} / N_{r,ph}^{(sat)}G_0^2$. Приведем параметры генератора, в случае, когда коэффициент усиления G_0 максимален (т.е. в оптимальном режиме):

$$\varepsilon_m = \varepsilon_{cl} + \Delta / \sqrt{8 \ln 2}, \quad G_0 = w_{spont}^{1mode} \frac{2\pi\hbar v_m}{L} N_e \hbar \omega_r \frac{8 \ln 2}{\sqrt{2\pi e}} \frac{1}{\Delta^2},$$

$$Q_0 = w_{spont}^{1mode} \frac{2\pi\hbar v_m}{L} N_e \sqrt{\frac{4 \ln 2}{\pi e}} \frac{1}{\Delta}, \quad N_{r,ph}^{(sat)} = v_m / 2Lw_{spont}^{1mode}.$$

С учетом этих выражений параметр

$$\Theta_{\min} = \frac{\sqrt{\pi e}}{4(\ln 2)^{3/2}} |\ln R_2| \frac{1}{\beta_m} \left(\frac{\Delta}{\hbar \omega_r} \right)^2 \left(\frac{N_e}{\Delta / (v_m \hbar 2\pi / L)} \right)^{-1}.$$

Здесь число $e = 2,72$, дробь $\Delta / \hbar \omega_r = N_{r,ph}^{(\Delta)}$ и дробь $\Delta / (v_m \hbar 2\pi / L) = \Gamma_\Delta$ – это, соответственно, число фотонов и число состояний одномерного пучка электронов на ширине энергетического разброса Δ . Следовательно, отношение $N_e / \Gamma_\Delta = \bar{N}_a^{(0)}$ – это среднее число электронов в произвольного начальном состоянии Ψ_a в интервале энергий $\varepsilon_m - 0,5\Delta \leq \varepsilon_a \leq \varepsilon_m + 0,5\Delta$. Учитывая введенные обозначения, полагая, что электроны релятивистские, а коэффициент отражения второго зеркала близок к единице (т.е. $1 - R_2 \ll 1$ и $|\ln R_2| \cong 1 - R_2$), мы получаем:

$$\Theta_{\min} = 1,27(1 - R_2) (N_{r,ph}^{(\Delta)})^2 / \bar{N}_a^{(0)}.$$

Рассмотрим генерацию фотонов с энергией $\hbar \omega_r \approx 2 \text{ эВ}$. Для этого необходим ондулятор длиной $L = 6,28 \text{ м}$ и с шагом $l_u = 2\pi / k_u = 12,56 \text{ см}$, а также пучок электронов с энергией $\varepsilon_m = 158 \text{ МэВ}$. Пусть площадь поперечного сечения пучка и разброс по энергиям, соответственно, равны 10^{-2} см^2 и $\Delta / \varepsilon_m = 10^{-3}$. Из неравенства $\bar{N}_a^{(0)} \ll 1$ следует, что ток пучка ограничен условием $j \ll 0,7 \cdot 10^3 \text{ А/см}^2$. Для приведенных параметров величина $N_{r,ph}^{(\Delta)} = 7,9 \cdot 10^4$. Мы рассматриваем невырожденные пучки электронов с $\bar{N}_a^{(0)} \ll 1$. Поэтому наибольшее допустимое значение $\bar{N}_a^{(0)}$ порядка 10^{-1} и параметр

$$\Theta_{\min} = 7,9 \cdot 10^{10} (1 - R_2).$$

Ясно, что для любых реальных зеркал $\Theta_{\min} \gg 1$. Этот результат позволяет упростить выражение (6)

$$\bar{N}_{r,ph} = N_{r,ph}^{(sat)} \frac{G_0}{\alpha_{mr}} \cdot [1 + 0,5\sqrt{\Theta}] = \bar{N}'_{r,ph} [1 + 0,5\sqrt{\Theta}].$$

Теперь выходная мощность генератора (4) имеет следующий вид

$$\bar{P}_{r,out} = \bar{P}'_{r,out} + \bar{P}'_{r,out} \sqrt{0,25\Theta}. \quad (8)$$

В (8) первое слагаемое является следствием условия стационарности, а второе – обусловлено спонтанным шумом. Так как $\Theta_{\min} \gg 1$, то оно намного больше первого.

Таким образом, в рамках развитой нами модели вклад спонтанного излучения электронов является доминирующим в выходной мощности генератора.

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] *Оганесян С.Г.* Флуктуации частоты излучения ондуляторного генератора, вызванные спонтанным шумом пучка электронов. Четвертая годовичная конференция Российско-Армянского (Славянского) Университета (1–4 декабря 2009г.), сер.: физико-математические и естественные науки. СС. 64–71.
- [2.] *Оганесян С.Г.* Эффект диффузии фазы в генераторе на свободных электронах. Пятая годовичная конференция Российско-Армянского (Славянского) Университета (6–10 декабря 2010г.), сер.: физико-математические и естественные науки. СС. 67–75.
- [3.] *Оганесян С.Г.* Исследование формы и ширины линии излучения ондуляторного генератора на свободных электронах. Шестая годовичная конференция Российско-Армянского (Славянского) Университета (5–9 декабря 2011г.), сер.: физико-математические и естественные науки. СС. 197–205.
- [4.] *Фейнман Р.* Квантовая электродинамика. М.: Мир, 220 с., 1964.
- [5.] *Зейгер С.Г., Климонтович Ю.Л., Ланда П.С., Ларионцев Е.Г., Фрадкин Э.Е.* Волновые и флуктуационные процессы в лазерах. М.: Наука, 1974.
- [6.] *Оганесян С.Г.* Исследование переходного процесса в ондуляторном генераторе на основе квантовоэлектродинамического подхода. Седьмая годовичная конференция Российско-Армянского (Сла-

- вянского) Университета (10–14 декабря 2012г.), сер.: физико-математические и естественные науки. СС. 67–72.
- [7.] *Оганесян С.Г.* Квантовоэлектродинамическая теория ондуляторного генератора. Восьмая годовичная конференция Российско-Армянского (Славянского) Университета (2–6 декабря 2013г.), сер.: физико-математические и естественные науки.

ЗАВИСИМОСТЬ ЧАСТОТЫ ПЛАЗМЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ОТ МЕЖЧАСТИЧНЫХ РАССТОЯНИЙ В ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОСФЕРАХ

В.А. Паплойн, А.О. Меликян

Аннотация

В данной статье представлено приближенное аналитическое решение задачи о спектре плазменных колебаний в системе двух металлических наносфер. Сущность приближения в том, что поле каждой сферы заменяется на поле диполя с конечным плечом, центр диполя смещается от центра сферы. Величины смещения и плеча определяются из граничных условий для электрического поля в квазистатическом приближении. Результаты хорошо согласованы с предыдущими результатами других исследований. Предлагаемый метод имеет ряд преимуществ по сравнению с численными методами и другими приближенными аналитическими методами.

Ключевые слова: поверхностный плазмон, связанные наносферы, граничные условия.

ՊԼԱԶՄՈՆԱՅԻՆ ՏՏՏԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ՀԱՃԱԽՈՒԹՅԱՆ ԿԱԽՎԱԾՈՒԹՅՈՒՆԸ ՓՈԽԱԶԳՈՎ ՄԵՏԱԳԼԱԿԱՆ ՆԱՆՈՍՖԵՐԱՆԵՐԻ ՄԻՋՄԱՍՆԻԿԱՅԻՆ ՀԵՌԱՎՈՐՈՒԹՅՈՒՆԻՑ

Վ.Ա. Պապլոյան, Ա.Օ. Մելիքյան

Ամփոփում

Տվյալ հոդվածում ներկայացված է երկու մետաղական նանոսֆերաների համակարգում պլազմոնային տատանումների սպեկտրի խնդրի մոտավոր անալիտիկ լուծումը: Մոտավորության էությունը կայանում է նրանում, որ յուրաքանչյուր սֆերայի դաշտ փոխարինվում է վերջավոր բազուկով դիպոլի դաշտով. արդյունքում դիպոլի կենտրոնը շեղվում է սֆերայի կենտրոնից: Շեղման և բազուկի մեծությունները որոշվում են էլեկտրական դաշտի կվազիստատիկ մոտարկմամբ խնդրի սահմանային պայմաններից: Արդյունքները համաձայնեցված են նախկին հետազոտությունների արդյունքների հետ: Առաջարկվող մեթոդն ունի մի շարք առավելություններ թվային և այլ մոտավոր անալիտիկ մեթոդների համեմատ:

Հիմնաբառեր՝ մակերևութային պլազմոն, փոխազդող նանոսֆերաներ, սահմանային խնդիր:

THE DEPENDENCE OF THE FREQUENCY OF PLASMONIC OSCILLATIONS ON THE INTERPARTICLE DISTANCE IN COUPLED METALLIC NANOSPHERES

V. Paployan, A. Melikyan

Summary

The article discusses an approximate analytical solution to the problem of the spectrum of plasma oscillations in a system of two metallic nanospheres. The essence of the approximation is that the field of each sphere is replaced by the field of a dipole with a finite arm, the center of the dipole being shifted from the sphere center. The magnitudes of the shift and the arm are determined from the boundary conditions for the electric field in quasistatic approximation. The results are in good agreement with previous results of other studies. The proposed method has several advantages compared with numerical and other approximate analytical methods.

Keywords: surface plasmon, coupled spheres, boundary conditions.

Введение

Из экспериментальных данных и численных расчетов хорошо известно, что для системы двух взаимодействующих металлических наносфер, поверхностная плазменная (ПП) частота ω_{sp} сильно зависит от межчастичного расстояния. Этот факт дает новые возможности для приложений взаимодействующих металлических наночастиц в молекулярной медицине как нано размерная линейка [10, 11].

Особенности оптических свойств в взаимодействующих частиц также могут быть использованы для химической или биологической обработки изображений, катетеризации. Зависимость частоты ПП нанопары от расстояния между частицами a более резкая, когда $a < 1.1D$ (D – диаметр сферы). Однако для таких малых расстояний используются разнообразные численные методы, требующие огромного количества вычислений [7, 12], которое становится серьезным препятствием для получения достоверных результатов.

Важно отметить, что все известные методы численных расчетов ω_{sp} , такие как широко используемый ДДР или Т-матрицы приводят к ошибкам в несколько процентов, которые возрастают с размером частиц в результате поверхностной или объемной дискретизации. Эти аргументы заставляют нас развивать новые подходы, которые позволяют аналитически сделать приблизительные расчеты ПП резонансных

частот при любом расстоянии между частицами. Физически простой подход, называемый «приближение исключенного квадрупольного момента (ПИКМ)», был разработан недавно [13]. Он позволяет легко получить продольную и поперечную ПП частоту резонанса для малых наночастичных пар $D < \lambda / 2\pi$. Суть метода в том, что электрическое поле каждой сферы заменяется на поле точечного диполя, расположенного в точке смещенной от центра сферы на определенное расстояние.

Далее, решение соответствующей краевой задачи позволяет определить самосогласованным образом расположение диполя и резонансную частоту. Было показано, что до $1.1D$ расстояния между центрами частиц отклонены от результатов полученных численными методами для ПП частот меньше, чем 2%. Было также показано, что $\omega_{sp}(a)$ зависимость хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией. Тем не менее, при малых расстояниях (менее $1.1D$) разница между результатами, полученными с помощью численных расчетов и приближенных аналитических методов, увеличивается. Этот факт показывает ограниченность применения этого подхода для случая почти касающихся (очень близких) наносфер. Следует отметить, что известны аналитические решения для касающихся сфер [14], однако мы заинтересованы в изменении частоты в зависимости от расстояния в случае очень малых расстояний.

Другой подход [15] основан на теории бесконечных дробей [16], что приводит к строго сходящему итерационному процессу, благодаря чему значительно снижаются как ошибки в расчетах, так и время расчета (результаты получаются в течение нескольких секунд). Метод не требует мощных компьютерных средств и позволяет быстро и эффективно обрабатывать экспериментальные данные. Это может быть расценено в качестве теоретической основы для теории «плазменной нано линейки» в крайне узком диапазоне межчастичных разделений. Преимущество этого метода показано на меньших, чем $0,1 D$ (почти касающихся наночастиц) межчастичных зазорах. Несмотря на преимущества этого метода, он не позволяет определить распределение поля, а с другой стороны, остается неясным физический смысл математической процедуры.

Для того чтобы избежать этих трудностей, в данной работе мы применяем обобщение ПИКМ, сформулированное в [13]. Данный подход позволяет достичь точного расчета ПИКМ для небольших расстояний путем введения ненулевого плеча диполя. Заменяем поле каждой сферы полем неточечного диполя, то есть, полем двух одинаковых точечных зарядов противоположенных знаков, разделенных конечным расстоянием, и решаем краевую задачу.

Улучшенный Аналитический Подход

Как уже отмечалось, заменяем поле каждой сферы полем неточечного диполя, то есть полем двух одинаковых зарядов противоположных знаков, q_1 в первой сфере и q_2 во второй, разделенными конечным расстоянием 2η . Геометрический центр этого диполя находится на прямой линии, соединяющей центры сфер в точке O' . Очевидно, что распределение заряда относительно центра диполя имеет только нечетные мультипольные моменты. Мы полагаем, что система должна быть меньше длины волны излучения, возникающего при колебаниях плазмы.

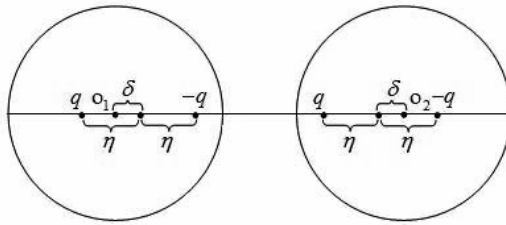


Рис. 1

В общем случае для разных сфер мы получим шесть уравнений с заданными значениями R_1, R_2 , и a для следующих величин: поверхностная плазменная частота взаимодействующих сфер ω_{sp} , которая входит в уравнение через действительную часть диэлектрической функции металла $\varepsilon(\omega)$; плечи диполей в первой и второй сферах $2\eta_1$ и $2\eta_2$ соответственно, (соответствующие дипольным моментам $2q_1\vec{\eta}_1$ и $2q_2\vec{\eta}_2$); отношение зарядов q_1/q_2 ; смещения δ_{1z} и δ_{2z} геометрических центров зарядов. Следует отметить, что дипольные моменты в случае продольных колебаний, направлены вдоль оси Z , тогда как для поперечных колебаний, они направлены перпендикулярно оси Z .

Граничные условия для потенциала электрического поля Φ и нормальной составляющей напряженности электрического поля $E_n = \frac{\partial \Phi}{\partial R}$ на поверхности правой сферы (Рис. 1) (сфера II) имеют вид:

$$\Phi_{ext} = \Phi_{int}, \quad \varepsilon_0 E_{ext,n} = \varepsilon(\omega) E_{int,n},$$

где в результате внешний потенциал $\Phi_{ext} = \varphi_1(\vec{R}) + \varphi_2(\vec{R})$ и $\varphi_2(\vec{R})$ – потенциал поля области II во внешней области и ε_0 – диэлектрическая постоянная окружающей среды. Для простоты мы рассмотрим продольные колебания и получим основные уравнения следующим образом. Общий потенциал ϕ_1 двух зарядов, которые индицируют поле первой сферы:

$$\phi_1 = q_1 \left(\frac{1}{|\vec{r} - \vec{\delta}_1 - \vec{\eta}_1|} - \frac{1}{|\vec{r} - \vec{\delta}_1 + \vec{\eta}_1|} \right) \quad (1)$$

могут быть расширены по отношению к центру второй области

$$\phi_1 = q_1 \sum (-1)^l \left(\frac{1}{a_{1+}^{l+1}} - \frac{1}{a_{1-}^{l+1}} \right) R_2^l P_l(\cos \theta) \quad (2)$$

где $\vec{a}_{1+} = \vec{a} - \vec{\delta}_1 - \vec{\eta}_1$ и $\vec{a}_{1-} = \vec{a} - \vec{\delta}_1 + \vec{\eta}_1$. Краевая задача решается с использованием результата в задаче диэлектрической сферы в поле точечного заряда [17], что приводит к следующему выражению для потенциала электрического поля, создаваемой поляризацией второй сферы в внешнем пространстве

$$\phi_1 = q_1 \sum (-1)^l \left(\frac{1}{a_{1+}^{l+1}} - \frac{1}{a_{1-}^{l+1}} \right) \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon(\omega)}{l\varepsilon_2(\omega) + \varepsilon_0(l+1)} P_l(\cos \theta) \quad (3)$$

Далее, для мультиполей низкого порядка ($L = 1, 2, 3$) мы приближаем потенциал в уравнении 3 как потенциал, созданный двумя зарядами, расположенными во второй сфере в точках $\vec{\delta}_2 \pm \vec{\eta}_2$ относительно центра, что приводит к отношению:

$$(-1)^l l R_2^{2l+1} \frac{q_1}{q_2} \left(\frac{1}{|\vec{r} - \vec{\delta}_1 - \vec{\eta}_1|^{l+1}} - \frac{1}{|\vec{r} - \vec{\delta}_1 + \vec{\eta}_1|^{l+1}} \right) \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon(\omega)}{l\varepsilon_2(\omega) + \varepsilon_0(l+1)} = |\vec{\delta}_2 + \vec{\eta}_2|^l - |\vec{\delta}_2 - \vec{\eta}_2|^l \quad (4)$$

Так как первая сфера поляризована в поле создаваемой двумя зарядами, расположенными в точках $\vec{\delta}_2 \pm \vec{\eta}_2$ во второй сфере, выражение, аналогичное уравнению 4, принимает форму:

$$lR_1^{2l+1} \frac{q_1}{q_2} \left(\frac{1}{|\vec{r} - \vec{\delta}_2 - \vec{\eta}_2|^{l+1}} - \frac{1}{|\vec{r} - \vec{\delta}_2 + \vec{\eta}_2|^{l+1}} \right) \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon(\omega)}{l\varepsilon_1(\omega) + \varepsilon_0(l+1)} = |\vec{\delta}_1 + \vec{\eta}_1|^l - |\vec{\delta}_1 - \vec{\eta}_1|^l \quad (5)$$

Уравнения 4 и 5 для $l = 1, 2, 3$ составляют необходимый набор для определения ПП спектра. Устраняя пять вспомогательных величин $\vec{\eta}_1, \vec{\eta}_2, \vec{\delta}_{1z}, \vec{\delta}_{2z}$ и q_1/q_2 , мы находим частоту ω_{sp} как функцию от параметров. В случае одинаковых сфер $\vec{\delta}_{2z} = -\vec{\delta}_{1z}$, $\vec{\eta}_{1z} = \vec{\eta}_{2z}$ эти уравнения могут быть упрощены:

$$2R^3 \frac{\varepsilon(\omega) - \varepsilon_0}{\varepsilon(\omega) + 2\varepsilon_0} \frac{a - \delta_z}{[(a - \delta_z)^2 - \eta^2]^2} = 1 \quad (6)$$

$$R^5 \frac{\varepsilon(\omega) - \varepsilon_0}{2\varepsilon(\omega) + 3\varepsilon_0} \frac{3(a - \delta_z)^2 + \eta^2}{[(a - \delta_z)^2 - \eta^2]^3} = \delta_z \quad (7)$$

$$12R^7 \frac{\varepsilon(\omega) - \varepsilon_0}{3\varepsilon(\omega) + 4\varepsilon_0} (a - \delta_z) \frac{(a - \delta_z)^2 + \eta^2}{[(a - \delta_z)^2 - \eta^2]^4} = 3\delta_z^2 + \eta^2 \quad (8)$$

где верхний знак относится к фазовым колебаниям зарядов в сферах, которые могут быть возбуждены оптически. Легко увидеть, что если плечи диполей стремятся к нулю, уравнения (6) и (7), как и ожидалось, сводятся к уравнениям ПИКМ.

Результаты

Численное решение уравнений (6) – (8) так же просто, как и в случае ПИКМ с точечным диполем. Сначала мы вводим новые безразмерные величины вместо η и δ :

$$\Delta = \frac{\delta}{R}, \quad H = \frac{\eta}{R}, \quad (9)$$

и меняем обозначения:

$$\frac{a - \delta}{R} = x, \quad \frac{\varepsilon(\omega)}{\varepsilon_0} = y, \quad \frac{a}{R} = 2s, \quad 2s - \Delta = x, \quad (10)$$

где s является расстоянием между центрами частиц, деленное на диаметр частиц. Теперь уравнения (6) – (8) принимают форму

$$2 \frac{y-1}{y+2} \frac{x}{(x^2 - H^2)^2} = 1 \quad (11)$$

$$\frac{y-1}{2y+3} \frac{3x^2 + H^2}{(x^2 - H^2)^3} = \Delta \quad (12)$$

$$12 \frac{y-1}{3y+4} x \frac{x^2 + H^2}{(x^2 - H^2)^4} = 3\Delta^2 + H^2. \quad (13)$$

Уравнение 11 позволяет определить зависимость H от x и y следующим образом:

$$H^2(x, y) = x^2 - \sqrt{2 \frac{y-1}{y+2} x}, \quad (14)$$

а потом исключить H из уравнений 12 и 13. Затем мы делим уравнение 13 на уравнение 11, чтобы получить конечное уравнение для решения:

$$\frac{y+2}{3y+4} - \frac{1}{6} [3\Delta^2(x, y) + H^2(x, y)] \frac{[x^2 - H^2(x, y)]^2}{x^2 + H^2(x, y)} = 0, \quad (15)$$

где функция $\Delta(x, y)$ определяется заменой H из уравнения 11 в 12

$$\Delta(x, y) = \frac{y-1}{2y+3} \times \frac{3x^2 + H^2(x, y)}{[x^2 - H^2(x, y)]^3}. \quad (16)$$

Обратим внимание, что, когда s меняется от единицы до бесконечности, Δ меняется от 0 до 1 так, что мы можем давать добавочному параметру x значения, начинающиеся с 1 до бесконечности. Мы графически определяем корни уравнения (15) для данного значения x , а затем подставляем значения x и y в уравнение 16 и в последнюю часть 10-го уравнения, чтобы получить соответствующие значения s . Таким образом, мы можем установить зависимость резонансного значения диэлектрической функции y от безразмерного межчастичного, от центра до центра расстояние $s = a/2R$, которое показано на рис. 2 (красные кружки). Для сравнения мы также представляем ту же зависимость, вычисленную с использованием метода бесконечных уровней [15] (голубая непрерывная линия), являющийся простейшим методом, который приводит к результатам, близким к опубликованным в научных статьях, цитируемых здесь для произвольных межчастичных расстояний.

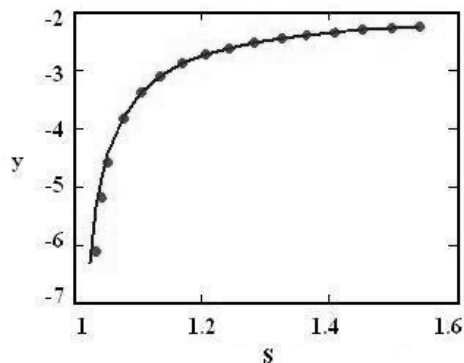


Рис. 2

Понятно, что наш метод не работает в случае очень малых межчастичных зазоров, например, для $s=1.03$ расхождение достигает 7%, в то время как быстро уменьшается для меньших межчастичных расстояний и для $s=1.04$ мы получаем ошибку в 3%. В то же время основанный на ПИКМ метод для $s=1.04$ дает отклонение в 22% от точного результата. Необходимо подчеркнуть, что ошибка вычисления для частоты меньше, чем ошибка вычисления для диэлектрической функции. Рассмотрим модель для $\epsilon(\omega)$ применяемую в ссылке 8, а именно: $\epsilon(\omega) = 10 - \omega_p^2 / \omega^2$, когда $\hbar\omega_p \approx 9\text{eV}$. Для типичного значения $\hbar\omega = 2\text{eV}$ получаем:

$$\frac{\Delta\epsilon(\omega)}{\epsilon(\omega)} \sim 4 \frac{\Delta\omega}{\omega}.$$

Заметим, что резонансные частоты могут быть определены из экспериментальных данных для $\epsilon(\omega)$ функции [18]. Важно отметить, что подход, разработанный в этом сообщении, не применим для расстояний, сравнимых с размером атома. Например, в случае одинаковых сфер, где $2R = 20\text{ нм}$, межчастичное расстояние $a/2R = 1.02$, представленное выше, соответствует всего 4 \AA расстояния между частицами и, очевидно, что должны быть учтены микроскопические эффекты.

Далее для каждого значения x и y мы находим зависимость полу-плечи диполя от уравнения 14 и величину сдвига центра диполя от центра сферы Δ , используя уравнение 16. Эти зависимости представлены на Рис. 3, где красные квадраты относятся к полу-плечу диполя, а открытые квадраты к смещению центра диполя.

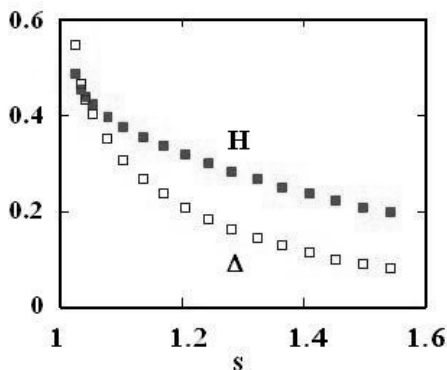


Рис. 3

Видно, что сдвиг центра диполя δ стремится к нулю гораздо быстрее, чем полу-плечо η . Это означает, что величина полу-плеча более важна, чем смещение центра диполя. Поэтому представленный подход дает более надежные результаты, чем основанные на ПИКМ расчеты, где электрическое поле сферы заменено полем точечного диполя.

В заключение отметим преимущества предлагаемого подхода по сравнению с методом непрерывных дробей. Во-первых, наш подход позволяет рассчитать распределение поля, используя выражения (3) – (5) с известными значениями $\epsilon(\omega)$, δ и η . Во-вторых, вычисленное поле может быть использовано в качестве нулевого приближения для расчета приближений высших порядков с помощью итерации. Как известно, из теории потенциала [19], используя приближенное выражение для поля, можно вычислить распределение заряда, индуцированное этим полем, затем рассчитать распределение нового поля, которое ближе к точному значению, чем приближение нулевого порядка. В-третьих, наш подход может быть обобщен для расчета ПП спектра и поля более сложных наночастичных систем.

Автор выражает благодарность А. Меликяну и Г. Минасяну за обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] *Wei Q.-H., Su K.-H., Durant S. and Zhang X.* Plasmon Resonance of Finite One-dimensional Au Nanoparticle Chains, *Nano Lett.* (4), 1067 (2004).
- [2.] *Atay T., Song J.-H., Nurmikko A.V.* Strongly Interacting Plasmon Nanoparticle Pairs: From Dipole-Dipole Interaction to Conductively Coupled Regime, *Nano Lett.* 4, 1627 (2004).

- [3.] *H. Xu, M. Käll.* Surface-Plasmon-Enhanced Optical Forces in Silver Nanoaggregates, *Phys. Rev. Lett.* 89, 246802 (2002).
- [4.] *F. J. Garcia de Abajo.* Multiple scattering of radiation in clusters of dielectrics, *Phys. Rev. B* 60, 6086 (1999).
- [5.] *I. Romero, J. Aizpurua, G.W. Bryant, F.J. de Abajo.* Plasmons in nearly touching metallic nanoparticles: singular response in the limit of touching dimmers. *Optics Express*, Vol. 14, 9988 (2006).
- [6.] *Ruppin R.* Surface modes of two spheres, *Phys. Rev. B*(26), 3440 (1982).
- [7.] *Shmeits M., Dambly L.* Fast-electron scattering by bispherical surface-plasmon modes *Phys. Rev. B* 44, 12706 (1991).
- [8.] *Hohenester U., Krenn J.* Surface plasmon resonances of single and coupled metallic nanoparticles: A boundary integral method approach *Phys. Rev. B* 72, 195429 (2005).
- [9.] *Chu P., Mills D.* Electromagnetic response of nanosphere pairs: Collective plasmon resonances, enhanced fields, and laser-induced forces *Phys. Rev. B* 77, 045416 (2008).
- [10.] *Jain P.K., Huang W., El-Sayed M.A.* On the Universal Scaling Behavior of the Distance Decay of Plasmon Coupling in Metal Nanoparticle Pairs: A Plasmon Ruler Equation *Nano Lett.* 7, 2080 (2007).
- [11.] *Reinhard B.M., Siu M., Agarwal H., Alivisatos A.P. and Liphardt J.* Calibration of Dynamic Molecular Rulers Based on Plasmon Coupling between Gold Nanoparticles, *Nano Lett.*, v.5, No. 11, P. 2246 (2005).
- [12.] *Nordlander P., Oubre C., Prodan E., Li K., Stockman M.I.* *Nano Lett.* 2004, 4, 899–903.
- [13.] *Chergui M., Melikyan A., Minassian H.* Calculation of Surface Plasmon Frequencies of Two, Three and Four Strongly Interacting Nanospheres, *J. Phys. Chem. C* (113), 6463 (2009).
- [14.] *Fernandez-Dominguez A.I., Maier S.A., Pendry J.B.* Collection and Concentration of Light by Touching Spheres: A Transformation Optics Approach, *Phys. Rev. Lett.* 105, 266807 (2010).
- [15.] *Madoyan K., Melikyan A., Minassian H.* Semianalytical theory of Plasmon nanoruler. *Appl. Phys. B*, 2010, 100, 875–881.
- [16.] *Swain S.* Continued-Fraction Methods in Atomic Physics, in *Advances in Atomic and Molecular Physics*. Volume 22, D, Bates and B. Benderson, Editors, Academic Press, Inc., 1986.
- [17.] *Stratton J.A.* *Electromagnetic Theory*, 2007, Wiley & Sons, Inc., P. 204.
- [18.] *Johnson P.B., Christy R.W.* Optical constants of noble metals. *Phys. Rev. B* 6, 4370 (1972).
- [19.] *Courant R.* Partial differential equations. In *Methods of Mathematical Physics* by R.Courant and D. Hilbert, Volume II, New York, London, 1962.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ СТЕКОЛ

М.А. Погосян, А.Г. Темирязов *

m_pogosyan@mail.ru, temiryazev@gmail.com

Аннотация

В настоящей статье приведены результаты исследования двух составов боросиликатного и алюмосиликатного стекол, обладающих ферромагнитными свойствами, с использованием атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопии. Показано, что в стеклообразной матрице образуются субмикронные магнитно-упорядоченные области.

Ключевые слова: стекло, ферромагнетик, атомно-силовая микроскопия, магнитно-силовая микроскопия.

ԱՏՈՄԱ-ՈՒԺԱՅԻՆ ՄԻԿՐՈՍԿՈՊԻ ԿԻՐԱՌՈՒՄԸ ՖԵՌՈՍԻԼԻԿԱՏՆԻ ԵՎ ԱԼՍՈՍԻԼԻԿԱՏՆԻ ՍՏԵՔՈՆԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՄԱՆ ՆՊԱՏԱԿՈՎ

Մ.Ա. Պոգոսյան, Ա.Գ. Տեմիրյազով

Ամփոփում

Աշխատանքում բերված են երկու՝ բորոսիլիկատային և ալյումոսիլիկատային ֆեռոմագնիսական հատկություններով օժտված ապակիների ուսումնասիրման արդյունքները ատոմա-ուժային և մագնիսա-ուժային միկրոսկոպի օգնությամբ: Յույց է տրված, որ ապակեկերպ միջավայրում առաջանում են մագնիսականորեն կարգավորված սուբմիկրոսկոպիկ ծավալներ:

Հիմնաբառեր՝ ապակի, ֆեռոմագնետիկ, ատոմա-ուժային միկրոսկոպիա, մագնիսա-ուժային միկրոսկոպիա:

* Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

APPLICATION OF ATOMIC FORCE MICROSCOPE FOR RESEARCH INTO FERROMAGNETIC GLASSES

M. Poghosyan, A. Temiryazev

Summary

The results of the study of two compositions of borosilicate and aluminosilicate glasses with ferromagnetic properties by using atomic force and magnetic force microscopy are presented in this paper. The formation of submicron magnetically ordered regions in glassy matrix has been shown.

Keywords: glass, ferromagnetic, atomic force microscopy, magnetic force microscopy.

О механизме проявления магнетизма в аморфных материалах впервые высказал предположение Губанов [1] в 60-ые годы XX века. По его мнению, магнетизм в аморфных материалах может возникнуть благодаря обменным взаимодействиям и появлению спонтанного магнитного момента в объеме одной или нескольких элементарных ячеек структуры. Это означает, что, несмотря на аморфную структуру всего объема материала, в определенных условиях возможно формирование микрообъемов с магнитным упорядочением. Подтвердить или опровергнуть эти предположения можно, проведя измерения методами магнитно-силовой микроскопии (МСМ) [2, 3], то есть используя для измерений атомно-силовой микроскоп (АСМ).

Целью настоящей работы явилось исследование рельефа поверхности и магнитных свойств оксидных стекол вышеперечисленными методами для выявления причин магнетизма в аморфных средах. Надо отметить также, что подобные исследования магнитных оксидных стекол в научной литературе отсутствуют.

В качестве объекта исследования служили два образца стекол боросиликатного и алюмосиликатного составов, содержащие в качестве магнитного компонента оксид железа. Магнитная проницаемость боросиликатного стекла составляла порядка 500–600 единиц, для алюмосиликатного стекла она менялась в пределах 750–900 единиц. Эксперименты проводились с помощью атомно-силового микроскопа SmartSPM (Аист-НТ). Для получения МСМ изображений использовались зонды с магнитным покрытием PPP-LM-MFMR (Nanosensors).

Боросиликатное стекло. Боросиликатный состав являлся пограничным, и при его получении в ходе охлаждения расплава от 1350–1400°С до комнатной температуры, по визуальным оценкам, почти 60–70% объема успевало закристаллизоваться. В результате получался композитный образец, состоящий из кристаллических фаз, распределенных в стеклообразной матрице. Неоднородность структуры боросиликатного стекла отражалась и на поверхности; даже после тщательной полировки образца, его поверхность оставалась шероховатой.

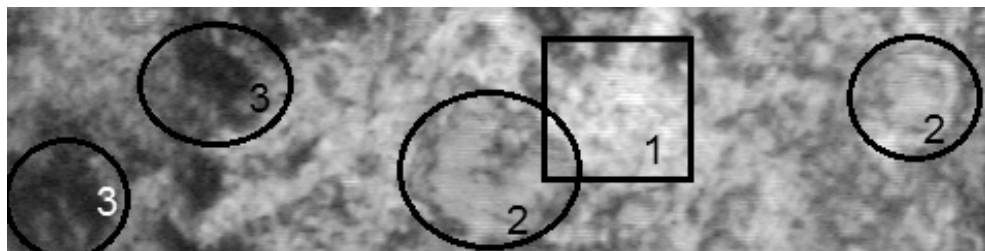


Рис. 1. Оптическое изображение участка (300 мкм x 75 мкм) поверхности боросиликатного стекла

На Рис. 1. представлен фрагмент оптического изображения участка поверхности боросиликатного стекла. Видно, что поверхность крайне неровная. Проведение магнитных измерений на таких объектах, а также интерпретация полученных данных достаточно сложна. В связи с этим первой задачей был поиск относительно гладкой области поверхности для дальнейшего МСМ исследования. Выбранный участок обозначен цифрой 1. Светлая центральная часть этой области позволяет предположить наличие относительно гладкой поверхности. Отметим, что на поверхности наблюдаются, по меньшей мере, два характерных типа особенностей. Цифрой 2 обозначены участки с заметной иризацией. Цифрой 3 отмечены темные области, они занимают значительную часть поверхности.

На Рис. 2 показана топография поверхности выделенного участка 1, измеренная с помощью АСМ. Приведены два типа представления данных АСМ измерений. На Рис. 2(а) высота изображена цветом (чем выше, тем светлее). Конкретное значение высоты можно оценить, используя цветовую шкалу. На рис. 2(б), профиль представлен в виде квазитрехмерной картины. Сопоставляя эти данные с оптическим изображением на рис. 1, мы видим, что темные области 3 соответствуют глубоким ямам на поверхности, а области иризации 2 – относительно плоским выступающим участкам.

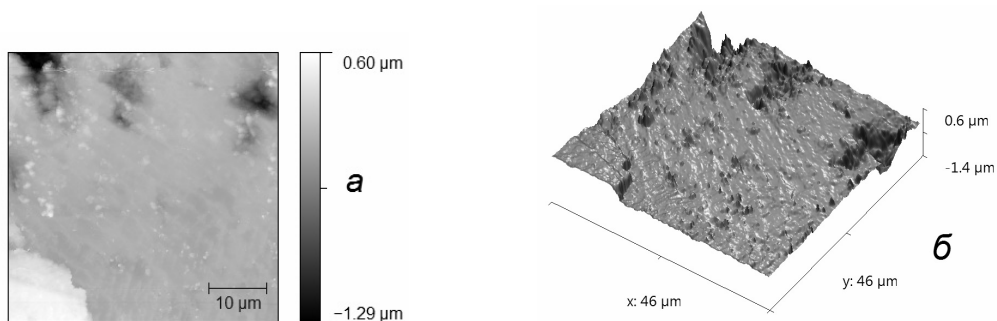


Рис. 2. Топография поверхности боросиликатного стекла

Центральная часть участка, изображенного на рис. 2, относительно гладкая, вероятно, она однородна в фазовом отношении и является основной стеклообразной фазой, выходящей на поверхность образца боросиликатного состава. В этой области были проведены дальнейшие измерения методами магнитно-силовой микроскопии. Результаты их представлены на Рис. 3. На Рис. 3(а) показан профиль поверхности

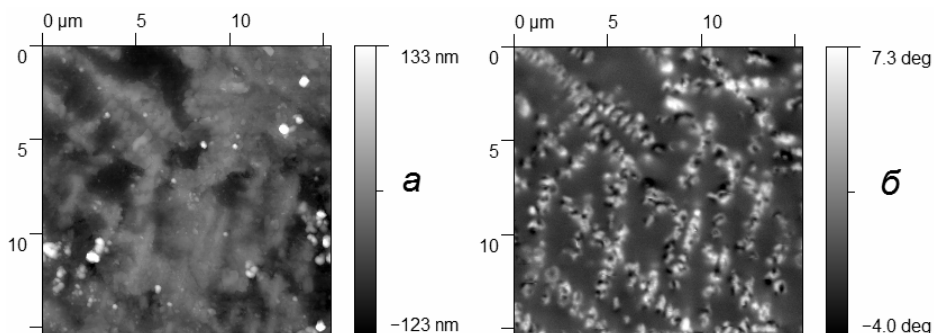


Рис. 3. Топография (а) и МСМ изображение (б) поверхности боросиликатного стекла

участка с размерами 15x15 мкм. На Рис. 3(б) представлена картина магнитного отклика, несомненно, демонстрирующая наличие магнитно-упорядоченных областей. Следует пояснить, что МСМ позволяет визуализировать магнитные поля рассеяния над поверхностью. Если быть точнее, то МСМ дает картину распределения второй производной нормальной компоненты напряженности магнитного поля (d_2H_z/dZ^2) – эта величина пропорциональна градиенту силы, действующей на иглу с магнитным покрытием. Если зонд притягивается к поверхности, то происходит уменьшение его резонансной частоты. Если при этом возбуждение зонда осуществляется на фиксированной частоте, то умень-

шение резонансной частоты приводит к увеличению фазы колебаний зонда. Картинка на Рис. 3(б) и отображает изменение фазы колебаний зонда. Серый фон соответствует отсутствию взаимодействия, светлые участки – притяжению, темные – отталкиванию. Ее можно интерпретировать следующим образом. Внутри немагнитной матрицы находятся области (частицы) субмикронных размеров, обладающие магнитным моментом. В случае, когда цепочки таких частиц располагаются вблизи поверхности, мы видим создаваемые ими поля рассеяния. Частицы в общем случае намагничены хаотично, поэтому, заметно и притяжение и отталкивание. Чаще наблюдается притяжение. Это может быть связано с тем, что часть частиц перемагнитилась под действием магнитного поля зонда. Альтернативная, хотя и менее вероятная интерпретация может заключаться в том, что магнитно-упорядоченные области представляют собой трубки, и наблюдается разбиение их на магнитные домены.

Алюмосиликатное стекло. Образец алюмосиликатного состава отличался высокой устойчивостью к кристаллизации и по внешнему виду казался полностью стеклообразным. На Рис. 4 представлено оптическое изображение поверхности (Рис. 4(а)) и профиль поверхности, измеренный с помощью АСМ (Рис. 4(б)). Сопоставление рисунков, показывает, что темные области на оптической картинке являются глубокими ямами, а поверхность между ними достаточно гладкая.

МСМ исследование, выполненное на ровном участке (Рис. 5), показало наличие магнитного отклика. Основное отличие от боросиликатного стекла заключается в существенно большей однородности распределения магнитных частиц. Кроме того, стоит отметить, что в основном частицы светлые, то есть зонд притягивается к ним. Скорее всего, это вызвано их низкой коэрцитивностью и перемагничиванием в поле

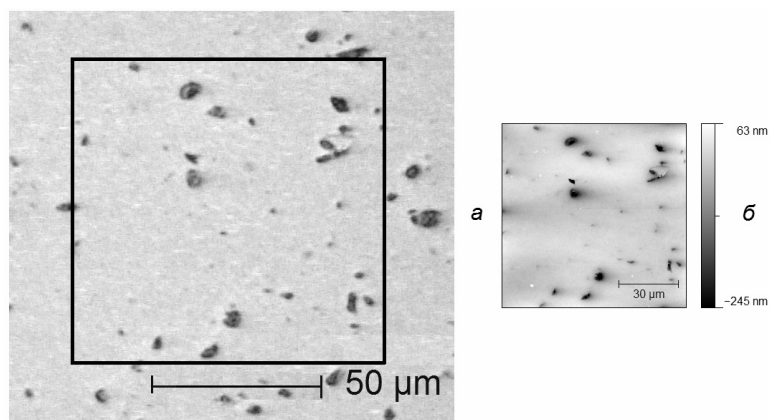


Рис. 4 Оптическое изображение (а) и топография выделенного участка (б) поверхности алюмосиликатного стекла

зонда. Частицы, вызывающие отталкивание зонда, наблюдались преимущественно вблизи дефектов поверхности.

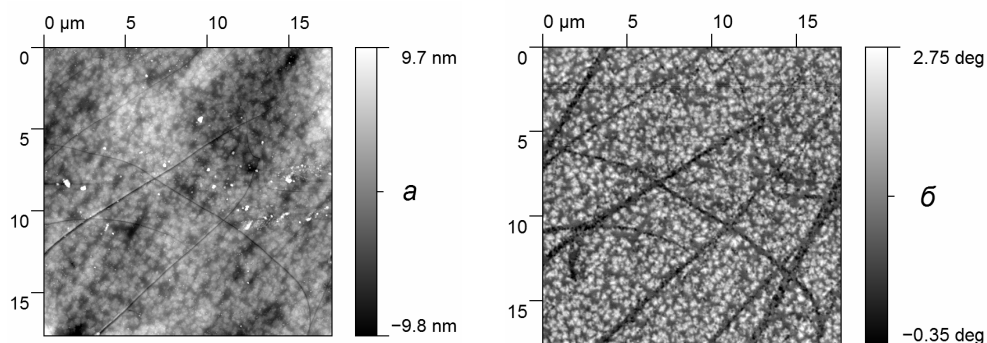


Рис. 5. Топография (а) и МСМ изображение (б) поверхности алюмосиликатного стекла

Таким образом, можно заключить, что ответственным за ферромагнитное поведение аморфных матриц, содержащих ферромагнитные компоненты, является формирование в них субмикронных областей магнитно-упорядоченной фазы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] Губанов А. И. О ферромагнетизме аморфных веществ. ФТТ, 1960 т. 2, № 3, С. 502.
- [2.] Hartmann U «Magnetic force microscopy» Annu. Rev. Mater. Sci., 1999, 29. PP. 53–87.
- [3.] Темирязов А.Г., Саунин С.А., Сизов В.Е., Темирязева М.П. Исследование доменных структур магнитных пленок с помощью магнитно-силовой микроскопии. Изв. РАН. Сер.: физическая, 2014, т. 78, № 1. СС. 78–81.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЭКОЛОГО-ЭТОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОСЕДЛЫХ И МИГРИРУЮЩИХ ВИДОВ ПОДКОВОНОСЫХ (RHINOLOPHIDAE) ЛЕТУЧИХ МЫШЕЙ ЮЖНОГО КАВКАЗА

М.К. Арутюнян

Аннотация

В данной работе впервые представлены миграционные пути и эколого-этологические особенности оседлых и мигрирующих видов подковоносов Мегели, южного, большого и малого, встречающихся в Армении и НКР.

Ключевые слова: подковонос, миграционный путь, оседлые, мигрирующие.

ՀԱՐԱՎԱՅԻՆ ԿՈՎԿԱՍԻ ՆՍՏԱԿՅԱՑ ԵՎ ԶՎՈՂ ՊԱՅՏԱՔԻԹ ԶՂՁԻԿՆԵՐԻ (RHINOLOPHIDAE) ԷԿՈԼՈԳԱԿԱՆ- ԵԹՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Մ.Կ. Հարությունյան

Ամփոփում

Աշխատանքում առաջին անգամ ներկայացվում են Հայաստանում և Արցախում հանդիպող պայտաքիթ չղջիկների Սեհելիի, հարավային և մեծ ու փոքր տեսակներից նստակյաց և չվող ներկայացուցիչների տեղաշարժման ուղիները և նրանց էկոլոգա-էթոլոգիական առանձնահատկությունները:

Հիմնաբառեր՝ պայտաքիթ, տեղաշարժման ուղի, չվող, նստակյաց:

THE ECOLOGICAL AND ETHOLOGICAL FEATURES OF SEDDENTARY AND MIGRATORY SPECIES OF RHINOLOPHIDAE OF THE SOUTH CAUCASUS

M. Harutyunyan

Summary

The article for the first time presents the migration routes and the features of sedentary and migratory species of Rhinolophidae – R. Mehelyii, R. ferrumequinum, R. hipposideros and R. euryale, encountered in Armenia and NKR.

Keywords: Rhinolophidae, migration route, sedentary, migratory.

До 1954г. сведения относительно рукокрылых Армении ограничивались лишь несколькими небольшими статьями, обобщенными в книге С.К. Даля «Животный мир Армянской ССР». Сведения эти затрагивали лишь некоторые вопросы их мест обитания и хозяйственного значения.

В 1990–2006гг. появились сообщения и труды Э.Г. Явруяна (1991), М.К. Арутюнян (1999), В.Т. Айрапетяна (2006), Г. Папова (2003), С. Балояна (2008), А. Казарян (2010), А. Вирабян (2006), посвященные тем или иным вопросам образа жизни и строения летучих мышей Армении и Арцаха. Однако все они не дают полного представления об особенностях, связанных с эколого-этологическими проявлениями в период миграций или в зимних убежищах.

Нам также эта задача не под силу в объеме всего отряда, включающего 29–30 видов из трех семейств – Mollosidae, Vespertilionidae и Rhinolophidae. В данной работе мы ограничиваемся представлением лишь пяти видов подковоносовых летучих мышей Армении и Арцаха – *Rhinolophus ferrum-equinum*, *Rh. mehelyi*, *Rh. euriale*, *Rh. hipposideros* и *Rh. blasii*.

Основные методы работ – общепринятые: эколого-этологические, предложенные А.П. Кузьякиным (1950), П.П. Стрелковым (1981) и Э.Г. Явруяном (1991). Использовались также методы мечения фосфорисцирующей краской, компостирование крыловой перепонки и кольцевание (кольца серии “X”, “Y”, “P”). Для обнаружения и фиксации пролета зверьков и мест обитания (зимовки) пользовались детектором “Pettersen-200” и навигатором “Magellan-350”. Места зимовки, летние убежища и пути пролета картировались точечно-координатным методом и фотографировались. Во время перелета в миграционных участках устанавливаются 3, 5, 15 или 30 метровые паутинные сети.

В результате исследований, осуществленных за период от 1996 по 2014гг., нами обнаружены более 800 природных убежищ (пещеры, гроты, расщелины скал, дупла и т.д.) и более 7500 мест проживания в человеческих постройках (чердаки, мосты, тоннели, шахты, подвалы, овчарни и т.д.) данных пяти видов летучих мышей в Армении и более 4200 мест в Арцахе.

Если кратко резюмировать полученные данные, то можно сказать:

- подковоносовые летучие мыши в Армении и Арцахе могут как зимовать, так и совершать сезонные кочевки или дальние миграции;
- зимовочное поведение различно в зависимости от вида убежища, его протяженности и микроклимата;
- периодические пробуждения, поиск корма и, как выяснилось, неоднократное спаривание в некоторых убежищах проявляются с определенной хронологией;

- четкие пути миграции с севера на юг, юго-восток или юго-запад сравнительно легко прочерчиваются внутри региона. У улетающих за пределы границ республик летучих мышей пути миграций зачастую становятся нечеткими и разветвленными;

- фиксированы случаи (*Rhinolophus euryale*), когда молодые появляются на свет практически у «спящих» особей. Это отмечалось, как правило, у молодых, дающих первый приплод.

В заключении можно сделать предварительный вывод, что практически все виды за период спячки время от времени просыпаются, подбирают зимующих с ними насекомых пауков, а также нередко спариваются.

Четко зарегистрированные сезонные перемещения внутри республик зафиксированы у *Rh. ferrum-equinum* между пещерами Ворован (Азух, НКР) и Магела (РА). Это даст возможность предположить, что остальная (не зимующая) часть представителей мигрирует с северо-востока региона на юг, юго-запад и далее в персидско-турецком-африканском направлении.

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] *Арутюнян М.К.* Экология, распространение и кариология некоторых видов рукокрылых Армении, Канд. дисс., Ер., 2006.
- [2.] *Айрапетян В.Т.* Рукокрылые Нагорного Карабаха. Канд. дисс., 2004.
- [3.] *Балоян С.С.* Биоразнообразие карстовых пещер Армении и Нагорного Карабаха. Канд.дисс., Ер., 2008.
- [4.] *Вирабян А.Р.* Эколого-морфологические особенности некоторых рукокрылых и грызунов Армении и НКР. Канд.дисс., Ер., 2006.
- [5.] *Казарян А.С.* Влияние условий окружающей среды на процессы нейрогенеза, происходящие в головном мозге летучих мышей. Канд.дисс., 2010.
- [6.] *Кузякин А.П.* Летучие мыши. М., 1950.
- [7.] *Папов Г.Ю.* Эколого-фаунистическое исследование и высотное распространение некоторых мелких млекопитающих Армении. Канд. дисс., Ер., 2008.
- [8.] *Стрелков П.П.* Рукокрылые. Каталог млекопитающих СССР., Л., Наука, 1981.
- [9.] *Явруян Э.Г.* Рукокрылые Закавказья и Средиземноморья. Докт. дисс., Ер., 1991.

БИОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КРОВИ КРЫС С ТОКСИЧЕСКИМ ГЕПАТИТОМ ПРИ ДЕЙСТВИИ СПИРТОВОГО ЭКСТРАКТА ЛАВРА БЛАГОРОДНОГО (*LAURUS NOBILIS*)

Г.Г. Гаспарян

georg-gasparyan@mail.ru

Аннотация

В данной серии экспериментов нами было изучено влияние спиртового экстракта лавра благородного (*Laurus nobilis*) на биохимические показатели крови крыс при токсическом поражении четыреххлористым углеродом. Проведен гистохимический анализ печени различных групп подопытных крыс.

Ключевые слова: лавр благородный (*Laurus nobilis*), биохимия крови, четыреххлористый углерод, гистохимия.

ԹՈՒՆԱՎՈՐ ՀԵՊԱՏԻՏՈՎ ՎԱՐԱԿՎԱԾ ԱՌՆԵՏՆԵՐԻ ԱՐՅԱՆ ԿԵՆՍԱՔԻՄԻԱԿԱՆ ՑՈՒՑԱՆԻՇՆԵՐԸ ԱԶՆՎԱԶԱՐՄ ԴԱՓՆՈՒ (*LAURUS NOBILIS*) ՍՊԻՐՏԱՅԻՆ ԼՈՒԾՈՒՅԹԻ ԱԶԳԵՑՈՒԹՅԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ

Գ.Գ. Գասպարյան

Ամփոփում

Մի շարք փորձերի ընթացքում ուսումնասիրվել է ազնվազարմ դափնու (*LAURUS NOBILIS*) սպիրտային լուծույթի ազդեցությունը ածխածնի տետրոքլորիդով ախտահարված առնետների արյան կենսաքիմիական ցուցանիշների վրա: Իրականացվել է փորձակենդանիների տարբեր խմբերի լյարդի հիստոքիմիական վերլուծություն:

Հիմնաբառեր՝ ազնվազարմ դափնի, արյան կենսաքիմիա, ածխածնի տետրոքլորիդ, հիստոքիմիա:

BIOCHEMICAL INDICATORS OF THE BLOOD OF RATS WITH TOXIC HEPATITIS UNDER THE EFFECT OF ETHANOLIC EXTRACT OF LAUREL (LAURUS NOBILIS)

G. Gasparyan

Summary

In this series of experiments we studied the influence of ethanolic extract of laurel (*Laurus nobilis*) on biochemical indicators of blood of rats in the presence of toxic lesion by carbon tetrachloride. The histochemical analysis of livers of various groups of experimental rats is carried out.

Keywords: laurel (*Laurus nobilis*), biochemistry of blood, carbon tetrachloride, histochemistry.

Введение

Проблема лечения гепатитов различной этиологии является чрезвычайно актуальной. Несмотря на большой арсенал гепатопротекторов, клиницистам не всегда удается добиться стабилизации течения гепатита, повышения регенераторной активности и предотвращения развития фиброза и цирроза печени. В связи с этим продолжают поиски новых лекарственных агентов, в том числе и растительного происхождения, обладающих широким спектром фармакологической активности и экономической доступностью. Объектом нашего внимания длительное время является лавр благородный (*Laurus nobilis*). Ранее нами было экспериментально доказано, что спиртовой экстракт лавра благородного обладает антиоксидантным и ранозаживляющим действием [1, 2]. Из исследуемой литературы нам достоверно известно о лечебных свойствах различных масел, приготовленных на основе лавра благородного (*Laurus nobilis*), применяемых при лечении заболеваний ЖКТ различной этиологии.

Ввиду вышесказанного вполне целесообразно было исследование экстракта лавра благородного (*Laurus nobilis*) как гепатопротектора в условиях цитотоксического воздействия. Особенно интересны были биохимические показатели крови крыс при токсическом поражении четыреххлористым углеродом, изменение морфологии гепатоцитов и, соответственно, изменение данных показателей в сочетании с экстрактом лавра благородного (*Laurus nobilis*).

Материал и методы исследования

Эксперимент выполнен на лабораторных белых беспородных крысах-самцах массой 170–200 гр., полученных из вивария Института Фи-

зиологии НАН РА, содержащихся в стандартных условиях на обычном пищевом и водном рационе. Все манипуляции с животными проводились согласно Женевской Конвенции 1986г.

Токсические повреждения печени моделировали путем внутрибрюшинного введения четыреххлористого углерода (CCl₄) в дозе 0,2 мл на 100 гр. массы крысы [3].

Экстракт лавра вводился в таком же количестве – 0,2 мл. /100 гр. массы крысы.

Все животные были разделены на 3 группы по 3–5 особей в каждой группе. Животные I-ой группы получали только CCl₄ и этанол; крысы II-ой группы – интактная группа (норма); III группа – CCl₄ и экстракт лавра (забивались в 3 этапа по 5 крыс в разные промежутки времени).

Экстракт в концентрации 1гр/10 мл. до введения стандартизировали по флавоноидам (0,2 мл экстракта содержало 0,8 мгр. флавоноидов). Контрольные группы забивались через 36 часов, крысы с экстрактом забивались спустя 36; 240; 480 часов. Крыс забивали под легким эфирным наркозом декапитацией с последующим забором биоматериалов (кровь, печень) для исследований.

В сыворотке крови всех исследуемых крыс определяли активность АЛТ, АСТ, ЩФ, ЛДГ, а также глюкозу, альбумин, билирубин, холестерин, тиглициды, мочевины. Печень промывалась буферным раствором и хранилась в 5% формалине для дальнейшей гистохимии в Институте Физиологии НАН РА.

В эксперименте на крысах указанный экстракт проявил гепатопротекторную активность, что, по-нашему мнению, связано с присутствием в его химическом составе флавоноидов и фенолокислот. Результаты биохимии показаны в виде таблицы (таблица 1).

Таблица 1

**Изменения основных биохимических показателей печени крыс
в норме и после обработки CCl₄**

	контроль	CCl ₄	CCl ₄ + экстракт лавра		
			36 час	240 час	480 час
АЛТ, е/л	58,6 ±3,9	120,4±41,3	103,4±11,7	84,4±5,5	79±5,42
АСТ, е/л	196,6±6,0	313,6±29,9	285±27,4	282,4±8,4	271±11,4
ЩФ, е/л	374±18,4	651,6±27,5	541,7±49,3	420,3±26,7	395,1±25,21
ГГТ, е/л	2,2±0,6	3,4±0,81	3,2±0,75	2,9±0,35	2,6±0,31
Глюкоза (мМ/л)	7,7±0,4	5±0,3	5,1±0,3	5,2±0,5	6,7±0,47
Альбумин, г/л	69,5±0,7	47,3±11,3	51,5±5,7	55,7±4,4	57,7±4,1

Билирубин, мкМ/л	4±0,66	6,2±2,3	6,9±1,4	11,7±1,3	9,3±1,2
Холестерин, мм/л	1,4±0,1	1,8±0,7	1,1±0,5	0,5±0,3	0,7±0,1
Триглицериды, мм/л	1,6±0,06	1,7±0,1	1,2±0,04	0,7±0,03	0,6±0,037
Мочевина, мм/л	4,6±0,34	5,4±0,41	4,4±0,2	3,5±0,19	3,3±0,197

Как видно из Таблицы 1., под действием CCL4 наблюдается значительное увеличение активностей АЛТ и АСТ, что характерно для цитолиза – одного из основных патологических синдромов поражения печени.

Введение экспериментальным животным экстракта лавра благородного (*Laurus nobilis*) привело к ослаблению гепатотоксического действия тетрахлорметана: выживаемость крыс повысилась до 100%. Изучаемый экстракт стимулировал нормализацию биохимических показателей крови животных: статистически значимо снизились активность АЛТ, АСТ, ЩФ и ГГТ (на 30, 21, 68, и 35%, соответственно). Графики показаны в процентном соотношении изменения активности (таблица 2).

Таблица 2

**Активность ряда ключевых ферментов печени крыс
в норме и при обработке CCl₄**

АЛТ		АСТ		ЩФ		ГГТ	
о.з.**	и.з.*	о.з.**	и.з.	о.з.**	и.з.	о.з.**	и.з.
100	58,6	100	196,6	100	374	100	2,3
205,5	120,4	159,5	313,6	174,2	651,6	152,2	3,5
176,5	103,4	145,0	285	144,8	541,7	141,2	3,2
144,0	84,4	143,6	282,4	112,4	420,31	130,7	3,0
134,8	79	137,8	271	105,6	395,1	117,1	2,7

*и.з. – истинное значение

**о.з. – относительное значение

На Рис. 1. показана динамика изменения активности ферментов печени крыс (%) при интоксикации CCL₄ и его совместном действии с *L. nobilis* в течение 36; 240; 480 часов.

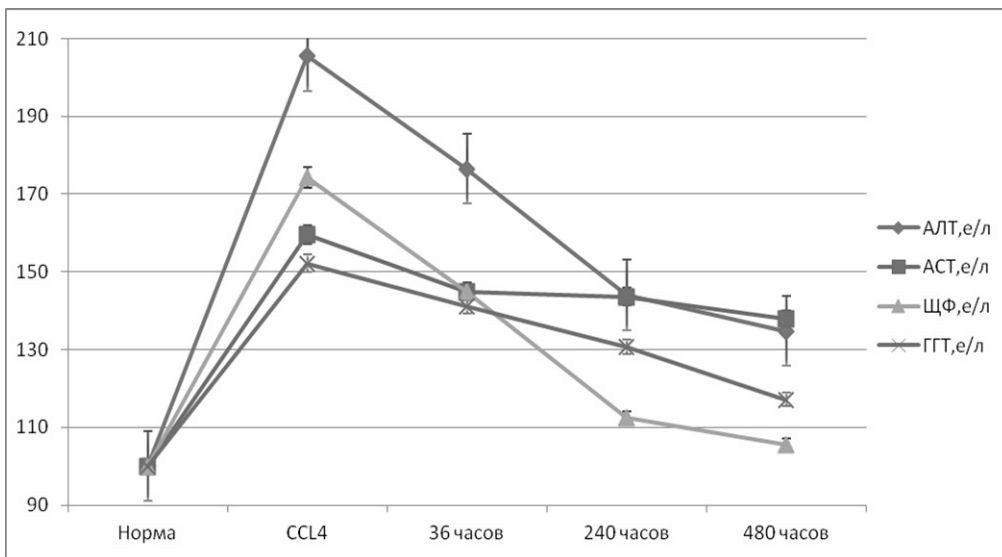


Рис. 1. Динамика изменения активности АЛТ, АСТ, ЩФ, ГГТ (%) в плазме крови крыс через 36, 240 и 480 часов после введения CCL₄ и экстракта листьев лавра

Для оценки и достоверного утверждения степени повреждения гепатоцитов при моделировании экспериментального гепатита (CCL₄) используют индекс де Ритиса (АСТ/АЛТ) [5, 6]. Отклонение значения индекса в сторону убывания говорит о повреждении гепатоцитов, в то время как повышение этого показателя свидетельствует о повреждении сердечной ткани. Значение индекса де Ритиса в контрольной группе составило 3,4, в группе под воздействием CCL₄ это соотношение равнялось 2,6, что наглядно показывает отклонение от нормы, характеризующее печеночное повреждение. Индекс де Ритиса для III группы крыс равнялся 2,8; 3,35 и 3,43 для подгрупп животных, забитых спустя 36, 240 и 480 часов, соответственно.

Ниже приведена таблица значения индекса де Ритиса (АСТ/АЛТ) (таблица 3), которая наглядно показывает отклонение от нормы, характеризующее печеночное повреждение, и тенденцию нормализации активности ферментов. CCL₄ > 36 ч. > 240 ч. после инъекции > 480 ч. после инъекции > норма.

**Значение индекса де Ритиса при моделировании
экспериментального гепатита (CCL₄)**

Норма	CCL ₄ (отр. контроль)	36 ч.	240 ч. после инъекции	480 ч. после инъекции
3,4	2,6	2,8	3,35	3,43

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] *Vardapetyan H.R., Tiratsuyan S.G., Hovhannisyan A.A., Martirosyan A.S.* Influence of various components of *H. perforatum* extracts on erythrocyte photodestruction. Int. Conf. "Biotechnology and Health" 2 & DAAD Alumni Seminar. PP. 91–98, 2008.
- [2.] *Vardapetyan H., Hovhannisyan D., Rukhkyan M., Gasparyan G.* Comparative analysis of flavonoid content and in vivo antiradical activity of *laurus nobilis* leaves extracts from different regions of south Caucasus "Vestnik RAU" №2. СС. 60–63, 2011г.
- [3.] *Чернов В.Н., Еникеев Д.А., Мышкин В.А.* Влияние тетрахлорметана, мексидола и соединения оксиметилурацила с янтарной кислотой на устойчивость взрослых и старых крыс к гипоксической гипоксии / Family Health in the XXI century. Oncology – XXI century (Materials of XI International Scientific Oncological Conference. 24.04-02.05.2007) Netherlands – Germany – France – Пермь: Изд-во «ПОНИЦАА». СС. 293–294, 2007г.
- [4.] Северина Е.С. Биохимия. С. 469. 779 с. ISBN 5-9231-0254-4, 2003г.
- [5.] *Lut G., Gambino S.R.* // Clin. Chem. 1972. V. 18. PP. 358–362.
- [6.] *Ройтберг Г.Е., Струтынский А.В.* Лабораторная и инструментальная.

ГРОМ: РЕДАКТОР ПАРАМЕТРОВ И МАНИПУЛЯЦИЯ КООРДИНАТНЫХ ФАЙЛОВ. ПЕРЕХОД ИЗ PYTHON НА PYTHON3.

О.В. Грабский
johnwo1990@hotmail.com

Аннотация

Данная статья посвящена созданию программного пакета, облегчающего работу с параметрами, топологическими и координатными файлами для GROMACS-а.

Ключевые слова: GROMACS, PDB, GRO, Python3, Qt5, ММД.

GROM: PARAMETER AND COORDINATE FILE EDITOR FOR GROMACS. PORTING FROM PYTHON TO PYTHON 3

H. Grabski

Summary

Grom is a fully integrated and efficient parameter and coordinate file editor for molecular dynamics package Gromacs. Grom is a cross-platform, python3/PyQt5 based [5,6], interactive program designed to break tedious editing of parameter and coordinate files. Grom features syntax highlighting for parameters and visual cues for coordinate files in one package making it accessible to both advanced and novice users. This tool provides enhanced functionality by speeding up and simplifying the task of setting up molecular dynamics simulations parameter and coordinate files of biological systems. Grom is open-source and can be freely downloaded from <https://github.com/hovo1990/GROM>.

Keywords: GROMACS, PDB, GRO, Python3, Qt5,MD.

ГРОМ: ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԵՒ ԿՈՈՐԴԻՆԱՅԻՆՆ ՖԱՅԼԵՐԻ ԽՄԲԱԳՐԱՅԻՆ ՓԱԹԵԹ GROMACS-Ի ՀԱՄԱՐ. ՓՈՒՍԱԳՐՈՒՄ PYTHON-ԻՉ PYTHON 3

Հ.Ճ.Գրաբսկի

Ամփոփում

Grom-ը լիովին ինտեգրված և արդյունավետ պարամետրերի եւ կոորդինացիոն ֆայլերի խմբագրային փաթեթ է մոլեկուլային դինամիկայի

GROMACS փաթեթի համար: Grom-ը խաչաձեւ պլատֆորմայի ինտերակտիվ ծրագիր է հիմնված python3/PyQt5 վրա [5,6], որը նախատեսված է հեշտացնել պարամետրերի եւ կոորդինացիոն ֆայլերի խմբագրման դժվար գործընթացը. Grom-ի առանձնահատկությունը նրանում է որ այն հնարավորություն է տալիս համախմբել պարամետրերի եւ կոորդինացիոն ֆայլերի տվյալները այն ավելի մատչելի դարձնելով թե փորձառու և թե սկսնակ օգտագործողների համար: Այս գործիքը ապահովում է ընդլայնված ֆունկցիոնալություն, որը արագացնում եւ պարզեցնում է մոլեկուլային դինամիկայի սիմուլացիայի պարամետրերի եւ կոորդինացիոն ֆայլերի ստեղծումը: Grom-ը ծրագրային փաթեթ է, անվճար է և կարող է ներբեռնվել <https://github.com/hovo1990/GROM>.

Հիմնաբառեր՝ GROMACS, PDB, GRO, Python3, Qt5,MD:

Введение

В настоящее время для создания молекулярных моделей и проведения *in silico* экспериментов используются разные пакеты программ, которые обеспечивают как виртуальное конструирование молекул, так и процессы взаимодействия тех или иных моделей [1]. Для использования таких программ необходимо настроить необходимые параметры для запуска симуляции.

Одним из быстро развивающихся программных пакетов для молекулярной динамики на сегодняшний день является GROMACS [3]. Для запуска процесса симуляции данная программа использует разные файлы с разными форматами. Необходимые топологические файлы имеют форматы “.itp”, “.top”. Параметры симуляции осуществляются форматами “.mdp”, а координаты молекулярной системы используют форматы “.pdb” и “.gro” [2].

Целью настоящей работы является создание программного редактора ГРОМ, который как визуально, так и функционально облегчает работу с файлами, используемые при молекулярном моделировании.

Описание программы ГРОМ. Г.Р.О.М. – это редактор параметров и координатных файлов (кросс-платформенное программное обеспечение) для GROMACS, на основе “Python3/PyQt5” [4, 5] и “Qt5” [6], содержащих элементы пользовательского интерфейса (виджеты), шаблоны контейнеров, средства работы с мультимедиа и т.п. (Рис.1.х.). Программа совместима как на операционных системах “Windows”, так и на “Mac” и “Linux”. Исходный код был полностью переведен из Python на Python3.

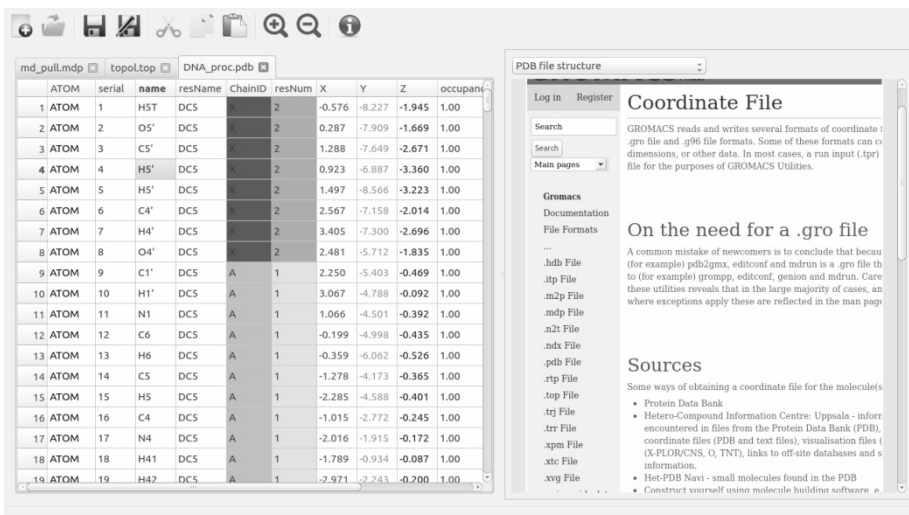


Рис.1.1. Программный пакет ГРОМ

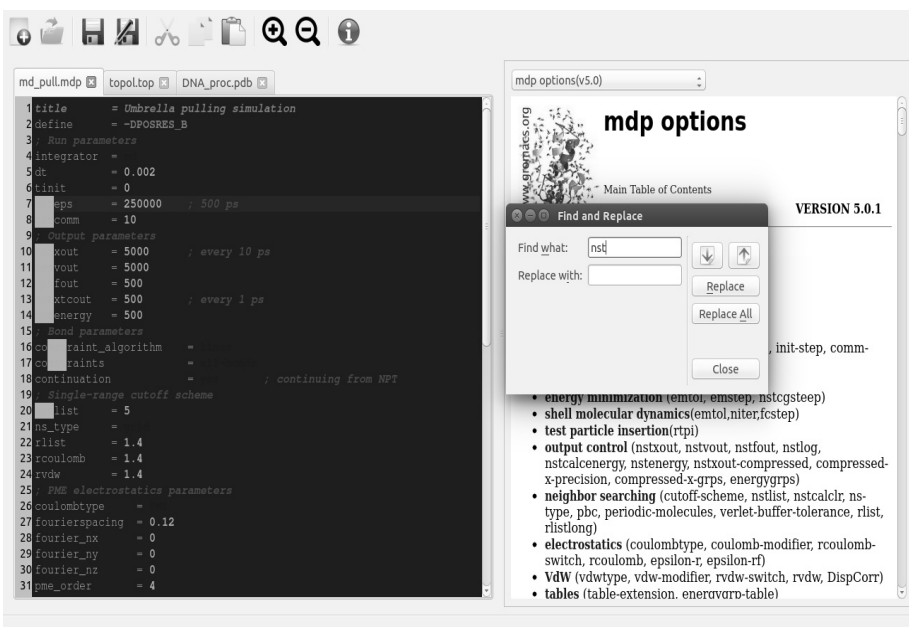


Рис.1.2. Программный пакет ГРОМ

Созданный нами редактор ГРОМ имеет ряд преимуществ над обычным текстовым редактором:

1. каждый параметр выделяется особым цветом, который соответствует его функции, что позволяет с лёгкостью разобраться в текстовой информации;
2. в одном интерфейсе можно одновременно работать с параметрами или таблицами и смотреть документацию;
3. возможность найти информацию о параметре в документации;
4. слова с ошибками автоматически подчеркиваются желтой линией, и предлагаются различные варианты;
5. рядом с каждой строкой указан численный номер;
6. автоматически распознает форматы файлов, также сохраняет их в этом же формате;
7. позволяет адекватно систематизировать координаты молекулярной системы (формата `.pdb` и `.gro`), за счет встроенного редактора таблиц;
8. в редакторе таблиц имеется особая система идентификации численных массивов в виде цветовых отличий, которые позволяют с лёгкостью отделить по категориям;
9. имеется также встроенная система оповещения ошибок;
10. в меню интерфейса входят отдельные вкладки для работы как с табличными данными, так и для редактирования параметров;
11. один интерфейс для нахождения значения в параметрах и в таблицах.

Интерфейс ГРОМ-а состоит из двух частей. Первая часть включает возможности оперирования численными массивами параметрических файлов. Характерной особенностью данной части является автоматическая систематизация ключевых параметров, таких как алгоритмы (синий цвет), комментарии (зеленый), значения (оранжевый) и др. (Рис. 2.х).

Надо отметить, что в этом интерфейсе данные имеют динамический характер, что облегчает систематизацию численных массивов. Программа автоматически размещает данные в отдельные табы.

Окно для редактирования таблиц является второй частью редактора. Для визуализации таблиц используются как разноцветные фонты, так и разноцветные ячейки. В столбцах систематизируются числовые массивы, показывающие пространственные координаты ($X_{\text{(красный)}}$; $Y_{\text{(зеленый)}}$; $Z_{\text{(синий)}}$), информацию о структурных параметрах, например, основания ДНК, очередной номер в массиве (желтый - зеленый) с постоянным чередованием и др. Для работы с остатками программа показывает совместимые с программой GROMACS.

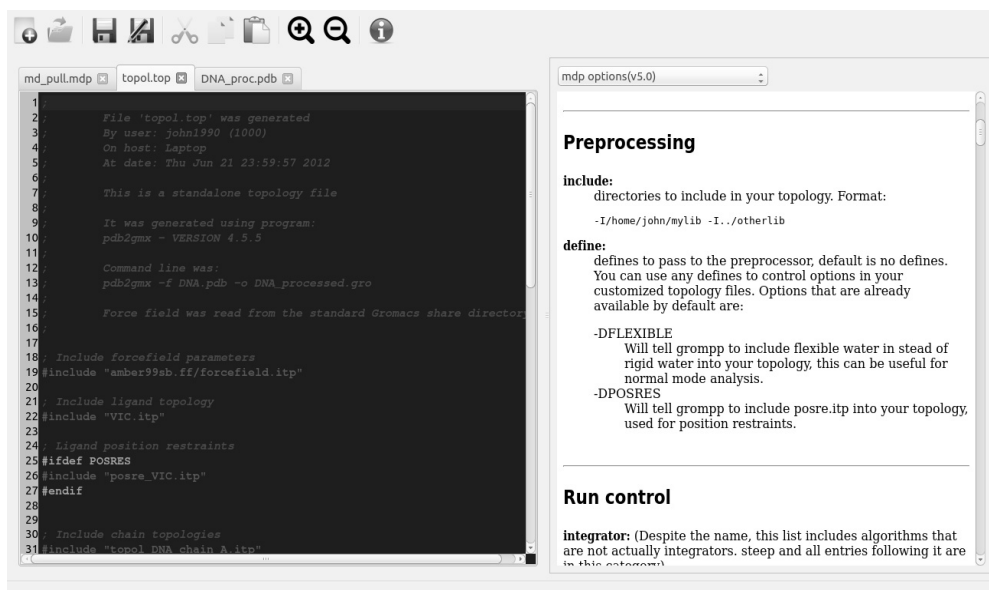


Рис. 2. Интерфейс параметрических файлов

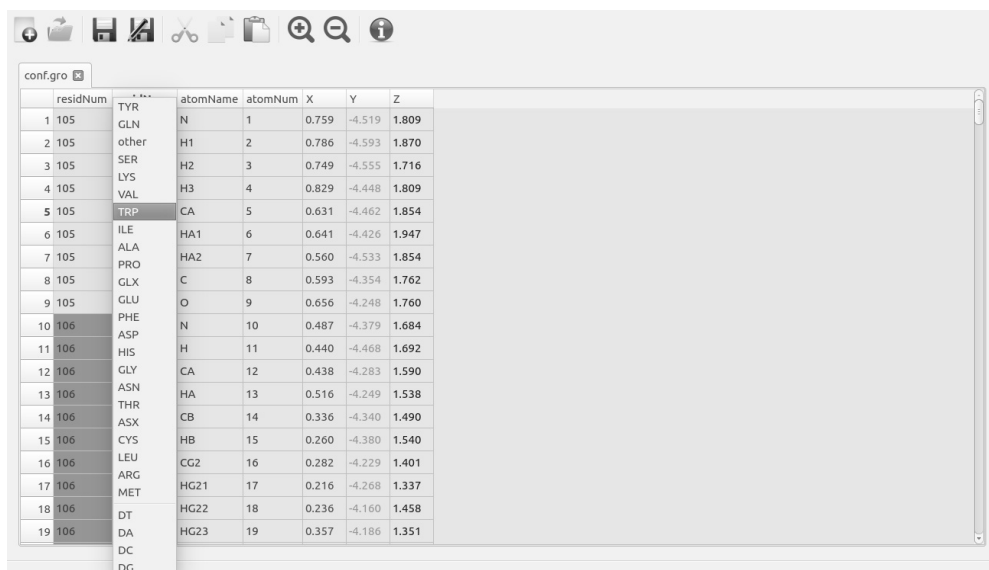


Рис. 3.1 Табы таблицы и остатки

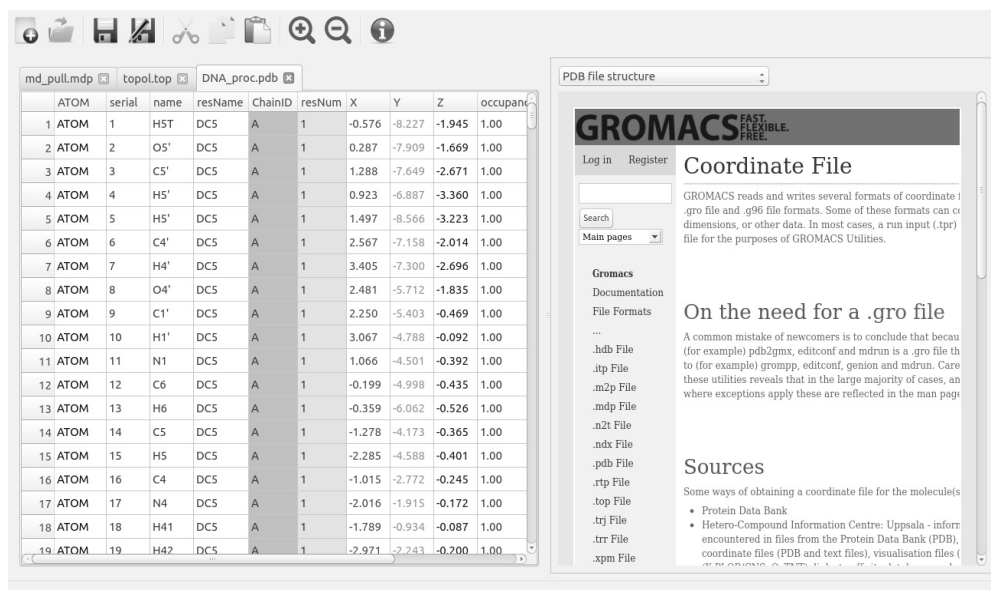


Рис. 3.2 Табы таблиц

Сложные пакеты молекулярной динамики, вроде GROMACS, нуждаются в специальных обслуживающих программах, вроде ГРОМ, так как условия каждой отдельной симуляции предъявляют свои особые требования и в таких случаях работа с файлами симуляции должна быть максимально удобной и быстрой.

Использование ГРОМА увеличивает эффективность, скорость создания и модификации файлов параметров и координат. Возможность универсального интегрирования в известные операционные системы расширяет сферу пользователей этого редактора и становится удобным инструментом как для начинающих исследователей, так и для тех, кто уже имеет опыт в работе с программными пакетами, используемыми в молекулярной динамике.

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] Durrant JD, McCammon JA: Molecular dynamics simulations and drug discovery. BMC Biol 2011, 9:71.
- [2.] Gromacs Manual: ftp://ftp.gromacs.org/pub/manual/manual-4.6.5.pdf PP. 130–144.

- [3.] *Sander Pronk, Szilárd Páll, Roland Schulz, Per Larsson, Pär Bjelkmar, Rossen Apostolov, Michael R. Shirts, Jeremy C. Smith, Peter M. Kasson, David van der Spoel, Berk Hess, and Erik Lindahl* GROMACS 4.5: a high-throughput and highly parallel open source molecular simulation toolkit *Bioinformatics* (2013) 29 (7). PP. 845–854 first published online February 13, 2013 doi:10.1093/bioinformatics/btt055
- [4.] Python Programming Language <http://www.python.org/>
- [5.] PyQt <http://www.riverbankcomputing.co.uk/software/pyqt/intro>
- [6.] Qt Framework <http://qt-project.org/>
- [7.] PyEnchant: a spellchecking library for Python
<http://pythonhosted.org/pyenchant/>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕТИЛЕНОВОГО СИНЕГО С ДНК МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

О.В. Грабский

johnwo1990@hotmail.com

Аннотация

Данная статья посвящена изучению прямого взаимодействия метиленового синего с ДНК, с использованием метода молекулярной динамики. Методом молекулярной динамики выявлены возможные сайты связывания.

Ключевые слова: ММД, МС, ДНК.

STUDY OF THE INTERACTION OF METHYLENE BLUE WITH DNA BY METHOD OF MOLECULAR DYNAMICS

H. Grabski

Summary

In modern oncology, biologically active substances of synthetic origin are used as chemotherapeutic drugs. Recently a new substance was added to the chemotherapeutic drugs list. Methylene blue (MB) is a well known histological dye that has been used for many years. MB is a phenothiazine compound.

The aim of the study is the investigation of the possible direct interaction of these compound with DNA by the method of molecular dynamics and the detection of spatial, energetic and other parameters of the given process.

The choice of the compound mentioned above is due to the fact that there is a big risk of side effect development during their use in the medical practice, conditioned by the possible interaction with the genetic material of the cell.

The obtained results demonstrate a direct interaction between MB with DNA. It should be noted that MB interacts with the phosphate groups of the sugar-phosphate backbone in the given segment 5'-CG-3' и 5'-ATT-3' of the major groove of DNA, with minor groove covering 5'-AATTCG-3' and 5'-ATT-3' segments.

The cavity that is formed from the twists and deformation around the central base pair differ from the other in parameters: Rise (3.7 Å) and Twist (26°) at 5'-TpT-3' and 5'-TpC-3'.

From the interaction standpoint: MB binding with minor groove of DNA is more favorable than MB-major groove of the DNA.

Keywords: MD, MB, DNA.

**ԳՆԹ-Ի ՀԵՏ ՄԵԹԻԼԵՆ ԿԱՊՈՒՅՏԻ ՓՈԽԱԶԳԵՑՈՒԹՅԱՆ
ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ՄՈԼԵԿՈՒԼԱՅԻՆ
ԳԻՆԱՄԻԿԱՅԻ ՄԵԹՈԴԻ ՕԳՆՈՒԹՅԱՄԲ**

Հ.Վ.Գրաբսկի

Ամփոփում

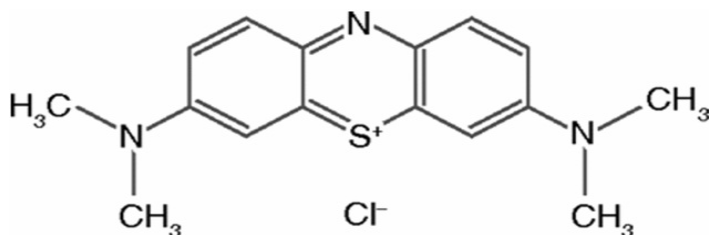
Ժամանակակից բժշկության մեջ որպես հակաուռուցքային դեղամիջոցներ օգտագործվում են նաև սինթետիկ ծագում ունեցող կենսաբանորեն ակտիվ միացություններ: Տվյալ միացությունների շարքին է պատկանում նաև մեթիլեն կապույտը: Շատ դեպքերում նման տիպի միացությունները ունենում են զդեցության մի քանի ճանապարհներ, որից մեկը հանդիսանում է հիմնական իսկ մյուսը/ները/ կողմնակի, ուստի աշխատանքում փորձ է արված բացահայտել ԳՆԹ-ի հետ մեթիլեն կապույտի փոխազդեցության տիպերը և մեխանիզմները՝ հաշվի առնելով ինչպես տարածաչափական այնպես էլ էներգետիկ չափորոշիչները:

Համակարգչային փորձերը ցույց են տալիս, որ մեթիլեն կապույտը անմիջականորեն փոխազդում է ԳՆԹ-ի և մեծ և փոքր ալկոսների հետ: Ստացված տվյալները վկայում են, որ մեթիլեն կապույտի փոխազդեցությունը ԳՆԹ-ի փոքր ալկոսի հետ ավելի կայուն է քան մեծ ալկոսի հետ:

Հիմնաբառեր՝ ՄԴ, ՄԿ, ԳՆԹ:

Введение

В современной онкологии используются биологически активные соединения синтетического происхождения. Недавно к числу препаратов присоединился метиленово синий (МС), который можно применять в качестве противоопухолевого агента [1]. Метиленовый синий – хорошо известный гистологический краситель, который используется на протяжении многих лет [2]. Он принадлежит к классу соединения фенотиазинов. Характерный цвет МБ вызван сильным поглощением в области 550–700 нм [3].



Րիս. 1. Химическая структура М.

Выбор данного соединения обусловлен тем, что, несмотря на структурные особенности, при использовании их в медицинской практике важным является высокий риск побочных явлений, обусловленных возможным взаимодействием с генетическим материалом клетки.

В данной статье в качестве модели растворителя использовали «явно заданный растворитель» типа TIP3, что обусловлено отсутствием рентгеноструктурного анализа комплекса ДНК-МС, а также наличием работ, связанных с использованием МД, где в качестве модели для воды пользовались «с неявным растворителем» [4].

Целью настоящей работы является исследование возможного прямого взаимодействия метиленового синего с ДНК методом молекулярной динамики (ММД) и выявление пространственных, энергетических и других параметров данного процесса.

Материалы и методы. В основе ММД лежит модельное представление о многоатомной молекулярной системе, в которой все атомы представляют собой материальные точки [5; 6].

При создании модели молекулы метиленового синего были получены силовые поля и топологические файлы с использованием разных программ по биомоделированию [7–12]. Для проведения компьютерного эксперимента был использован фрагмент двухцепочечного ДНК (додекамер Дикерсона) В-формы, состоящей из 12 пар оснований со следующей последовательностью в соответствии с принятыми протоколами по биомоделированию [13].



Для моделирования в качестве пространственного бокса был выбран додекаэдр диаметром 45.85 \AA с длиной ребра 30.66 \AA и с объемом 201.88 нм^3 , количеством воды и ионов 6316 мол.

Время симуляции – 60 нс, временной шаг $\Delta t = 2 \text{ фс}$ при постоянной температуре $T = 300 \text{ К}$ и давлением в 1 атм.

Были получены 60 первичных моделей, 30 – взаимодействия метиленового синего с малым бороздкой ДНК, 30 – с большим бороздкой ДНК.

Координаты всех атомов записывались каждые 2 пс. Расчетные критерии радиуса взаимодействия рассчитывались по стандарту: для Кулоновских взаимодействий – 0.9 нм , Ван-дер-Ваальсовских взаимодействий – 1.4 нм [14].

Результаты и обсуждения. Для исследования возможности прямого взаимодействия МС с ДНК был проведен «компьютерный эксперимент». Используя метод «слепой способ», описывающий энергетически выгодные точки взаимодействия [15; 16], были получены возможные места связывания метиленового синего с ДНК.

На Рис. 2 показаны возможные места прямого взаимодействия МС с ДНК. Отметим, что МС взаимодействуют с фосфатными группами сахарофосфатного остова, перекрывая участки 5'-CG-3' и 5'-ATT-3' большого желобка ДНК, малым желобком перекрывают участки 5'-AATTCG-3' и 5'-ATT-3'.

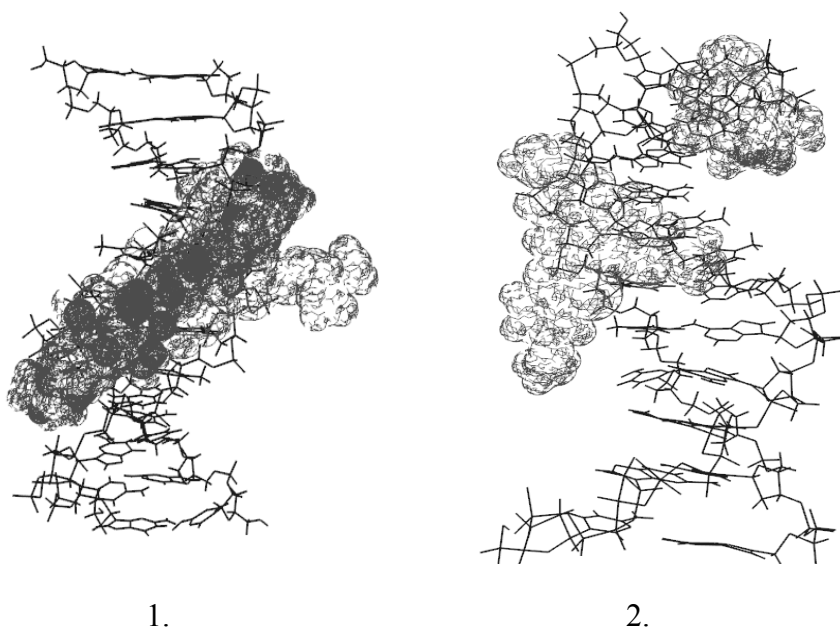


Рис. 2. Возможные места связывания на молекуле ДНК: 1) взаимодействие с малым желобком 2) с большим желобком

Нужно отметить, что взаимодействие происходит за счет Кулоновских взаимодействий (Рис. 3.).

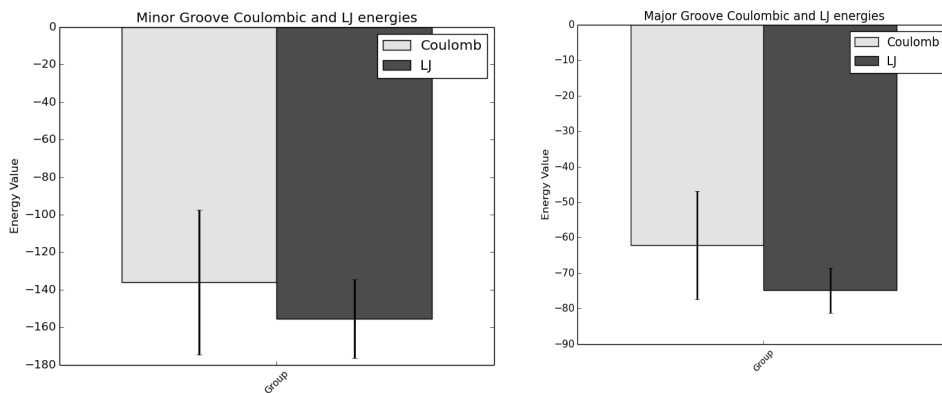


Рис. 3. Энергетика Кулоновских и Ван-дер-Ваальсовых Взаимодействий

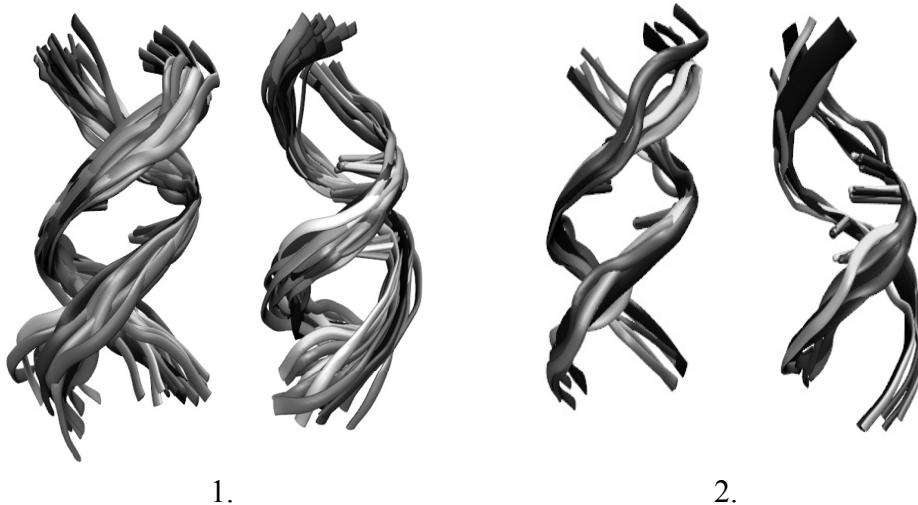


Рис. 4. Наложение структур МД при взаимодействии. 1) МС с малым бороздкой 2) с большим на экспериментальной полученной структуры (синий цвет). (Вид спереди и сбоку)

На Рис. 4. показано наложение структур из полученной симуляции с помощью программы x3DNA по 6-ому пар оснований [17]. Синим цветом обозначена экспериментально полученная структура. Ориентация лиганда как в малом бороздке, так и на большом отличаются друг от друга. Если при взаимодействии с малой бороздкой ось лиганда параллельна обоим цепочкам сахаро-фосфатного остова (Рис. 2.1), то в случае с большой бороздкой лиганд параллельна лишь к одной из цепочек сахарофосфатного остова (Рис. 2.2).

На Рис. 5 показаны параметры двойной спирали ДНК, параметры, полученные для взаимодействия с малой бороздкой (треугольником с вершиной вниз) и с большой бороздкой (треугольником с вершиной вверх) сравниваются с экспериментально полученной структурой ДНК. График показывает, что самые резкие отличия заметны при взаимодействии МС с большой бороздкой ДНК. Полости образуемы от растяжения и раскручивания возле центральной пары основания, отличаются друг от друга в расчетах для параметра Rise (3.7Å) и Twist(26°) у 5'-ТрТ-3' и 5'-ТрС-3'.

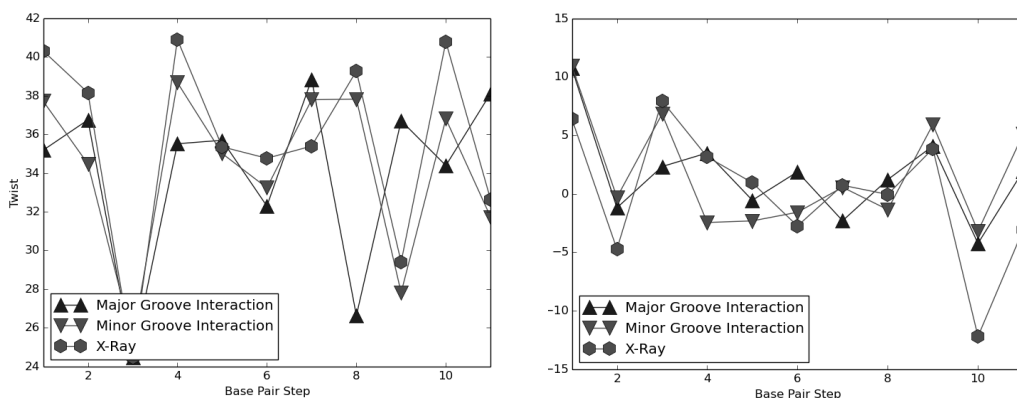
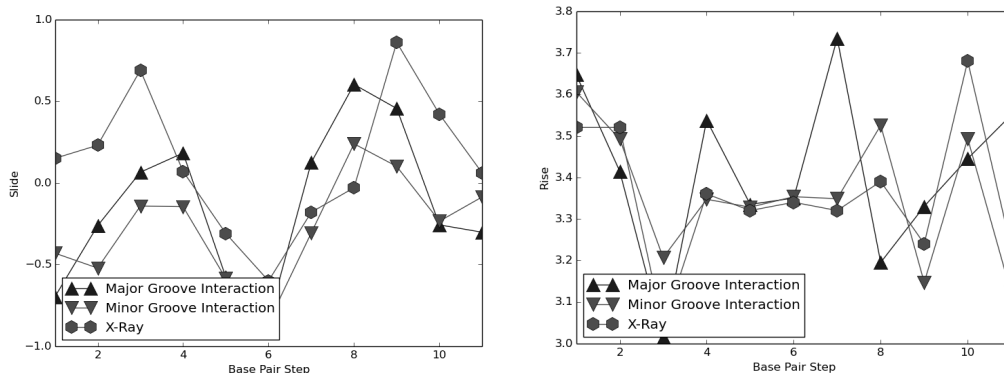


Рис. 5. Сравнения параметров шагов пар оснований взаимодействия метиленового синего.



На Рис. 2. показаны значения, полученные при «компьютерном эксперименте» для МС. Как видно из рисунка, взаимодействия с малой бороздкой имеет более высокое сродство к ДНК, по сравнению с большой бороздкой (за счет Кулоновских сил).

С точки зрения взаимодействия с ДНК, взаимодействия с малой бороздкой более выгодно, чем с большим бороздкой. Таким образом, из полученных результатов следует, что вероятность взаимодействия с малой бороздкой выше, чем с большой бороздкой. МС с большой бороздкой имеет меньше средств.

При правильном выборе и использовании программных пакетов по биомоделированию, особенно для низкомолекулярных соединений типа метиленового синего. ММД дает нам возможность получить очень ценные данные, которые не всегда доступны в лабораторных условиях, и более детально изучить процесс взаимодействия двух и более соединений, в разных пространственно-временных критериях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] *Lim E.J.I, Oak C.H, Heo J, Kim Y.H.* Oncol Rep. 2013 Aug; 30 (2): 856-62. doi: 10.3892/or.2013.2494. 2013 May 24. Methylene blue-mediated photodynamic therapy enhances apoptosis in lung cancer cells.
- [2.] *Tuite E.M, Kelly J.M.* Photochemical interactions of methylene blue and analogues with DNA and other biological substrates. J Photochem Photobiol B 1993; 21. PP. 103–124.
- [3.] *Junqueira H.C., Severino D., Dias L.G., Gugliotti M., Baptista M.S.* Modulation of the methylene blue photochemical properties based on the adsorption at aqueous micelle interfaces. Phys Chem Chem Phys 2002; 4: 2320–8.
- [4.] *Remo Rohs, Heinz Sklenar, Richard Lavery and Beate Röder.* Methylene Blue Binding to DNA with Alternating GC Base Sequence: A Modeling Study. J. Am. Chem. Soc., 2000, 122 (12). PP. 2860–2866.
- [5.] *Allen M.P. and Tildesley D.J.* Oxford: Clarendon Press, 2002.
- [6.] *Шноль Э.Э., Гривцов А.Г. и др.* М.: Наука, 1996.
- [7.] *Hess B., Kutzner C., Van der Spoel D., Chem E.J.* Theory Comput. 4. PP. 435–447, 2008.
- [8.] *Petterson E., Goddard T., Huang C., et al.* J. Comput Chem., 25 (13). PP.1605–1612, 2004.
- [9.] *Wang J., Wolf R., Caldwell J. et al.,* J. of Comput. Chem 25. PP. 1157–1174, 2004.
- [10.] *Wang J., Wang W., Kollman P.* Case D, J. of Mol. Graph. and Mod., 25. PP. 247–260, 2006.

- [11.] Marvin , ChemAxon (<http://www.chemaxon.com>), 2012.
- [12.] *Sousa Da Silva, A.W. & Vranken, W.F.* ACPYPE - AnteChamber PYthon Parser interfacE. BMC Research Notes 2012, 5:367.
- [13.] *Macke T., Svrcek-Seiler W.A.* et al A Comp. Lang. for Struc Exp. Updated , 2012.
- [14.] *Hornak V., Abel R.* et al, Struc., Function, and Bioinform. V. 65. PP. 712–725, 2006.
- [15.] <http://autodock.scripps.edu/resources/adt>
- [16.] <http://vina.scripps.edu/>
- [17.] *Xiang-Jun Lu & Wilma K. Olson* (2003). ‘3DNA: a software package for the analysis, rebuilding and visualization of three-dimensional nucleic acid structures’, Nucleic Acids Res. 31(17), 5108–21.

mtMart – A NOVEL DATABASE FOR COMPLETE HUMAN MITOCHONDRIAL GENOMES

A. Yesayan, H. Hovhannisyan, L. Yepiskoposyan

grant.hovhannisyan@gmail.com
Institute of Molecular Biology, NAS RA

Summary

In consequence of intensive human population genetics studies that take place nowadays, human mitochondrial genome data are continuously accumulating, while the effective methods of this massive information storing and management lag behind. For instance, publicly available databases of human mitochondrial DNA (mtDNA) are either not updated regularly or lack functional tools for appropriate data parsing. In this work, we introduce the mtMart – a novel manually curated database for complete human mitochondrial genomes that significantly facilitate effective managing of large-scale genomic data.

Keywords: human mitochondrial genome, database, mtMart.

mtMart – НОВАЯ БАЗА ДАННЫХ ЦЕЛЫХ МИТОХОНДРИАЛЬНЫХ ГЕНОМОВ ЧЕЛОВЕКА

А. Есаян, Г. Оганесян, Л. Епископосян
Институт молекулярной биологии НАН РА

Аннотация

Проводимые в настоящее время интенсивные популяционно-генетические исследования способствуют непрерывному накоплению информации, в частности, по митохондриальному геному человека, в то время как методы хранения и обработки большого массива данных являются неэффективными. Базы данных открытого доступа митохондриальной ДНК человека регулярно не обновляются или не обладают достаточной функциональностью для результативного управления информацией. В данной работе мы представляем разработанную нами базу данных mtMart для целых митохондриальных геномов человека, которая значительно повышает эффективность управления большими массивами геномной информации.

Ключевые слова: митохондриальный геном человека, база данных, mtMart.

**mtMart – ՄԱՐԳՈՒ ԱՄԲՈՂՁԱԿԱՆ
ՄԵՏՈՔՈՆԳՐԻՈՒՄԱՅԻՆ ԳԵՆՈՄՆԵՐԻ
ՏՎՅԱԼՆԵՐԻ ՆՈՐ ԲԱԶԱ**

**Ա. Եսայան, Հ. Հովհաննիսյան, Լ. Եպիսկոպոսյան
ՀՀ ԳԱԱ Մոլեկուլային կենսաբանության ինստիտուտ**

Ամփոփում

Ներկայումս ինտենսիվ իրականացվող պոպուլյացիոն գենետիկական հետազոտությունների շնորհիվ շարունակաբար կուտակվում են մարդու միտոքոնդրիումային գենոմի տվյալները, մինչդեռ նման ծավալուն տեղեկությունների պահպանման և կառավարման արդյունավետ մեթոդները չեն բավարարում արդի պահանջներին: Այսպես, մարդու միտոքոնդրիումային ԳՆԹ-ի մատչելի տվյալների բազաները կա՛մ պարբերաբար չեն թարմացվում, կա՛մ օժտված չեն տվյալների վերլուծության պատշաճ գործիքներով: Սույն աշխատանքում ներկայացվում է մեր կողմից զարգացված մարդու ամբողջական միտոքոնդրիումային գենոմների տվյալների նոր բազա՝ mtMart-ը, որն էականորեն կիեշտացնի գենոմային հսկայածավալ տեղեկությունների արդյունավետ կառավարումը:

Հիմնաբառեր՝ մարդու միտոքոնդրիումային գենոմ, տվյալների բազա, mtMart:

Today, the advances of molecular biology techniques, such as the novel DNA sequencing methods, have made the mitochondrial genome a versatile tool for phylogenetics, population genetics, forensic science and other disciplines [2, 3]. Despite the fact that the human mitochondrial DNA is a tiny molecule ca. 17,000 b.p. [1], the continuously accumulating large-scale mitogenomic data make the handling, analyzing and comparing the mtDNA gene pools of different human populations problematic. Recently, several attempts were made to design and create publicly available mtDNA databases; however, some of them are no longer updated and maintained, while the rest do not provide convenient functionality for effective data management and further analysis.

For instance, HvrBase++ [6] and mtDB [5] databases were launched in 2006, but have not been updated since 2007, while the number of new mtDNA partial and complete sequences has increased significantly since then. On the other hand, the Phylotree [6] and Mitomap [7] human mitochondrial DNA databases are updated regularly; however, the absence of functional tools that might help to deal with large datasets of mtDNA molecules of different characteristics restricts the efficacy of data handling.

Moreover, so far there is no human mtDNA database that provides precise information about mtDNA haplogroup, the population the individual belongs to and the geographic location of the population.

Here we introduce the mtMart (by analogy with BioMart search engine of Ensemble genome browser [4]), a new database for human complete mitochondrial DNA data that combines the advantages, is free from the drawbacks of previously described databases and has new functional features for effective data parsing.

The main principles of mtMart workflow are described in Fig. 1. The database is designed with MySQL open-source relational database management system. Its functional characteristics are implemented by PHP and JavaScript (jQuery) programming languages. mtMart retrieves the information about human mitochondrial genomes (however, in principle it can be used to retrieve any query) directly from the National Center of Biotechnology Information (NCBI, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>), which provides the API (Application Programming Interface), using the range of accession numbers of interest. By processing the INSDSeq XML file, which is generated from GenBank (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank>) and contains all the information about the query, mtMart stores the obtained data in internal memory, sorting it by the accession number, complete mitochondrial genome in FASTA format, size of the molecule in base pairs and the reference where the molecule was first described.

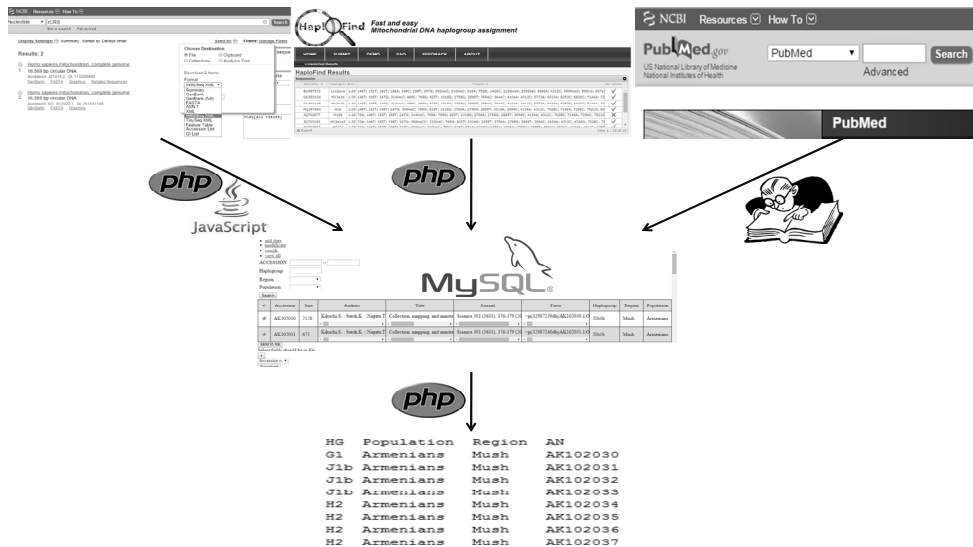


Figure 1. Basic principles of mtMart workflow

One of the main features of mtMart is the possibility to manually add the information about haplogroup, mutation data, population and geographic region to any record of the database. Haplogroup and mutation data will be generated and appended to mtMart using Haplofind web application [9], while the population and geographic data will be added to mtMart manually. This approach ensures precision and high quality of the data stored in mtMart.

Another important feature of mtMart is the possibility to search, sort and download data in a very customizable way. One can sort it either by haplogroup, population, geographic region or combine all these options in order to obtain the necessary result. After that, all necessary information can be sent to the tab separated *.txt* file with the desired order of the columns for further analysis.

For now, the development of mtMart is still under progress; however, in the nearest future it will be publicly available for use with other functional characteristics.

REFERENCES

- [1.] *Anderson, Sharon, Alan T. Bankier, Bart G. Barrell, M. H. L. De Bruijn, Alan R. Coulson, Jacques Drouin, I. C. Eperon et al.* Sequence and organization of the human mitochondrial genome. (1981): 457-465.
- [2.] *Bandelt, H. J., Richards, M., & Macaulay, V.* (2006). Human mitochondrial DNA and the evolution of Homo sapiens (Vol. 18). Springer.
- [3.] *Calvalli-Sforza, L. Luca, and Marcus W. Feldman.* The application of molecular genetic approaches to the study of human evolution. *Nature Genetics* 33 (2003): 266–275.
- [4.] *Flicek, Paul, M. Ridwan Amode, Daniel Barrell, Kathryn Beal, Konstantinos Billis, Simon Brent, Denise Carvalho-Silva et al.* Ensembl 2014. *Nucleic acids research* (2013): gkt1196.
- [5.] *Ingman, Max, and Ulf Gyllensten.* mtDB: Human Mitochondrial Genome Database, a resource for population genetics and medical sciences. *Nucleic acids research* 34, no. suppl 1 (2006): D749–D751.
- [6.] *Kohl, Jochen, Ingo Paulsen, Thomas Laubach, Achim Radtke, and Arndt von Haeseler.* HvrBase++: a phylogenetic database for primate species. *Nucleic acids research* 34, no. suppl 1 (2006): D700–D704.

- [7.] *Ruiz-Pesini, Eduardo, Marie T. Lott, Vincent Procaccio, Jason C. Poole, Marty C. Brandon, Dan Mishmar, Christina Yi, James Kreuziger, Pierre Baldi, and Douglas C. Wallace.* An enhanced MITOMAP with a global mtDNA mutational phylogeny. *Nucleic acids research* 35, no. suppl 1 (2007): D823–D828.
- [8.] *Van Oven, Mannis, and Manfred Kayser.* Updated comprehensive phylogenetic tree of global human mitochondrial DNA variation. *Human mutation* 30, no. 2 (2009): E386-E394.
- [9.] *Vianello, Dario, Federica Sevini, Gastone Castellani, Laura Lomartire, Miriam Capri, and Claudio Franceschi.* HAPLOFIND: A New Method for High-Throughput mtDNA Haplogroup Assignment. *Human mutation* 34, no. 9 (2013): 1189–1194.

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПОВЕДЕНИЯ И АКТИВНОСТИ МЕЛКИХ ВИДОВ МЛЕКОПИТАЮЩИХ МЕТОДОМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОТОЛОВУШКИ

Л. Папаян

Аннотация

Несмотря на тот факт, что первые фотоаппараты появлялись еще в XIX в., их использование в зоологических исследованиях стало возможным в недалеком прошлом в связи с прорывом в области информационных технологий. Появление фотоловушек и видеорегистраторов позволяет исследовать поведение и активность животных в их естественных средах обитания дистанционными методами. При этом, время и погодные условия существенной роли не играют, т.к. новые модели дают возможность снимать при любых условиях. В наших исследованиях будем использовать фотоловушку 940NM HD 2013г. (Рис. 1). Данная модель имеет сенсорные датчики, которые реагируют на движения животного, и вспышку для ночной съемки. Они также позволяют получить фото и видео материалы высокого разрешения в ночном и в дневном режиме. Наша цель – получить сведения о поведении и суточной активности некоторых видов мелких млекопитающих.

Ключевые слова: фотоловушка, дистанционные методы, фотографии, видео.

ՄԱՆՐ ԿԱԹՆԱՍՈՒՆՆԵՐԻ ՎԱՐՔԱԳԾԻ ԵՎ ԱԿՏԻՎՈՒԹՅԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԼՈՒՍԱՆԿԱՐՉԱԿԱՆ ԹԱԿԱՐԳՆԵՐԻ ՕԳՆՈՒԹՅԱՄԲ

Լ. Պապյան

Ամփոփում

Չնայած այն փաստին, որ առաջին լուսանկարչական սարքերը հայտնվել են դեռևս 19-րդ դարում, դրանց կիրառումը կենդանիների ուսումնասիրությունների ոլորտում հնարավոր դարձավ միայն ոչ վաղ անցյալում՝ ինֆորմացիոն տեխնոլոգիաների կտրուկ զարգացման շնորհիվ: Լուսա- և տեսանկարահանող թակարդների ի հայտ գալով հնարավոր դարձավ ուսումնասիրել

կենդանիների վարքագծային առանձնահատկությունները հեռակառավարման մեթոդներով՝ անկախ եղանակային պայմաններից և ժամից: Մեր ուսումնասիրություններում կօգտագործենք 2013թ. արտադրության 940NM HD մոդելը (նկ. 1), որը զգայուն դետեկտորների և լուսարձակների շնորհիվ հնարավորություն կտա ստանալ բարձրորակ լուսանկարներ և տեսաժապավեններ: Մեր առաջիկա նպատակը հանդիսանում է այս կերպ կաթնասունների որոշ մանր տեսակների վարքագծի և ակտիվության վերաբերյալ տեղեկություններ ստանալը:

Հիմնաբառեր՝ թակարդ, հեռակառավարում, լուսանկար, տեսաժապավեն:

REVIEW OF RESEARCH ON THE BEHAVIOR AND ACTIVITY OF SMALL SPECIES OF MAMMALS WITH THE HELP OF CAMERA TRAPS

L. Papyan

Summary

The history of camera starts from the 19th century. However, usage of cameras in zoological research has become possible only towards the end of 20th century. A camera trap is a remotely activated camera that is equipped with a motion sensor or an infrared sensor or uses a light beam as a trigger. Camera trapping is a method for capturing wild animals on film when researchers are not present, and it has been used in ecological research for decades. In our research we will use the camera trap 940NM HD (pic. 1) which will enable us to take high quality photos and videos even at night because of the nightvision mode and the flashlight. We hope to receive important information about the behavior and activity of some small species of mammals.

Keywords: camera trap, HD, mammals, activity.

Введение

Использование цифровых фотоловушек становится все более популярным методом исследования круглосуточной активности и поведенческой особенности животных [1], [2]. Преимущества данного метода очевидны. Установка фотоловушек непосредственно около входов нор и вблизи человеческих жилищ позволяет описать не только суточную активность вышеупомянутых видов и основные социальные взаимодействия животных (Kruuk, 1989 и др.), а также зарегистрировать от-

личия в их поведении и активности в связи с местом обитания. Однако, несмотря на кажущуюся простоту установки фотоловушек, надо учитывать ряд важных факторов, связанных с небольшими размерами и другими видовыми особенностями этих видов, постоянным присутствием в данной местности людей и домашних животных.

Мы планируем применять фотоловушки для изучения некоторых видов мелких грызунов на территории Армении и Арцаха начиная с декабря 2014г. В наши планы также входит долговременный и подробный мониторинг нескольких видов (полевок – *Microtus*, лесных мышей – *Apodemus*, крыс – *Rattus*, хомяков – *Cricetinae* и т.д.) в связи с повышением уровня синантропности данных видов.

В ряде случаев возникает необходимость исследовать популяции, например, редких и исчезающих видов животных, когда изъятие может нанести непоправимый ущерб данным видам. Методы исследований могут быть направлены на выявление и визуальную идентификацию животных, суточную и сезонную активность, пространственное распределение при интенсивной постановке фотоловушек могут позволить изучать плотность населения, при долговременных наблюдениях – возможность проследить динамику численности и т.д. Зачастую получение уникальных снимков дает ценнейшую информацию о жизни отдельного вида.

Материалы и методы. При изучении экологии грызунов часто возникает необходимость определить присутствие или посещение того или иного места животным, эффективного проведения регистрации событий при любом уровне освещения (и в полной темноте). В условиях низкой освещенности объектов съемки рекомендуется использование 1–2 фотовспышек, расположенных под разными углами к цели. Данный метод позволяет применять его для съемки самых мелких млекопитающих, а также птиц и беспозвоночных.

Новые виды фотоловушек позволяют легко осуществить многие из перечисленных желаний исследователей. Практика показала, что для полевого применения необходимо устройство, которое должно быть: компактным, легко настраиваемым, с возможностью работы при любом световом режиме, с независимым и минимальным энергопотреблением, с максимальным информационным ресурсом, неуязвимым к метеоусловиям и, наконец, недорогим в приобретении и эксплуатации.

Мы остановили свой выбор на модели 940NM HD (Рис. 1). Основные характеристики фотоловушек, необходимые для успешной работы в полевых условиях: питание от батареек типа AA/AAA в количестве от 4 до 8 шт. Устройство имеет возможность работать от 4-х батареек в течение 4–5 часов. Однако для более длительной работы необходимо

иметь полный комплект батареек АА из 8-и шт. Прекрасным вариантом является также возможность зарядки устройства солнечной энергией или внешним источником питания.

Запись информации ведется на карту памяти формата SD емкостью 8/16/32 Гб класса не ниже 8, что позволяет записывать порядка 10–12 часов видео в формате HD720. Устройство позволяет вести запись маленькими фрагментами до 1 минуты. Новые модели дают возможность снимать отрывки на 1–2 часа. Запись короткими фрагментами имеет свои плюсы. Такая форма очень удобна для быстрого просмотра записанного материала прямо у объекта съемок, чтобы при необходимости провести коррекцию. Для этого используется встроенный ЖК-дисплей.



Рис. 1

Ночная подсветка на модели 6 ИК-светодиодами. Включается автоматически датчиком освещённости. Очень удобна для наблюдений мелких млекопитающих, когда запись событий проводится на ограниченном участке площадью порядка 1 м² достаточно. Для освещения большей территории потребуются дополнительный прожектор.

Имеется датчик движения, однако при съемках грызунов эта функция не работает: скорости перемещений зверьков в поле зрения камеры велики, а объекты, как правило, малы и не вызывают автоматического включения камеры.

Для работы во влажных условиях (осадки, роса) необходима установка камеры в боксы или иная защита. Применение боксов также служит защитой от крупных животных, которые могут повредить или даже сломать фотоловушку.

Ожидаемые результаты. Примером полевого применения фотоловушек являются наблюдения за норвежским леммингом (*Lemmus lemmus* L.) в тундре Кольского полуострова и грызунами в Тверской области в 2011 году [3]. Мы планируем установить фотоловушки сначала вблизи человеческих поселений для изучения синантропности мелких грызунов, а затем в природных условиях – для сравнительного анализа суточной активности и поведения тех же видов в разных средах обитания. Будет интересно также наблюдать межвидовые отличия в поведении животных.

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] *Сидорчук Н.В.* и др. Опыт использования фотоловушек при изучении поведенческой экологии барсука *Meles meles*//Териофауна России и сопредельных территорий: матер. VIII съезда Териологич. об-ва. М., 2007. с. 455.
- [2.] *Эрнандес-Бланко* и др., 2010 Опыт применения цифровых фотоловушек для идентификации Амурских тигров, оценки их активности и использования основных маршрутов перемещений животными. // В кн.: «Амурский тигр в Северо-Восточной Азии: проблемы сохранения в XXI веке» /Отв. Ред. Журавлев Ю.Н. Владивосток, Дальнаука. СС. 100–103.
- [3.] *Сидорчук Н.В., Рожнов В.В.* Дистанционные методы изучения барсуков: некоторые особенности использования фотоловушек//Дистанционные методы изучения в зоологии: матер. научн. конф. М.: Товарищество научных изданий КМК. 2011. С. 87.

ДЕВЯТАЯ ГОДИЧНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

Сборник научных статей

Главный редактор – М.Э. Авакян
Корректор – Э.А. Рухкян
Корректор – Ш.Г. Мелик-Адамян
Компьютерная верстка –

Адрес Редакции научных изданий Российско-Армянского
(Славянского) университета:
0051, г. Ереван, ул. Овсена Эмина, 123
тел./факс: (+374 10) 27-70-52, (внутр. 42-02)
e-mail: redaction@gmail.com

Заказ № 18
Подписано к печати 10.10.2015г.
Формат 70x100¹/₁₆. Бумага офсетная № 1.
Объем усл. п.л. Тираж 200 экз.

Отпечатано в типографии:
ООО «ВМВ-Принт»
г. Ереван, пр. Азатутяна 24
Тел: (+374 10) 28-54-28
e-mail: vmv_print@yahoo.com