

электронное сетевое издание РОССИЙСКИЙ технологический журнал

RUSSIAN TECHNOLOGICAL JOURNAL

Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности

Роботизированные комплексы и ситемы. Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего котроля

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

Микро- и наноэлектроника. Физика конденсированного состояния

Аналитическое приборостроение и технологии

Математическое моделирование

Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств

Мировоззренческие основы технологии и общества



ТОМ 7 № 3 2019 год

www.rtj-mirea.ru

ISSN 2500-316X

Российский технологический журнал 2019 том 7 № 3

DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3

Учредитель и издатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» Издается с декабря 2013 года (прежнее название «Вестник МГТУ МИРЭА»). Выходит один раз в два месяца Founder and Publisher: Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «MIREA – Russian Technological University» Published from December 2013 (former name is «Herald of MSTU MIREA») six times per year

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук,
на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК)
Индексируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)
Является членом Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и Cross Ref
Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор),
свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС77-74578 от 14 декабря 2018 г.

Ответственный секретарь: Доц. О.В. Есипова

> **Редакция:** Проф. Т.М. Буслаева Л.Г. Семерня Г.Д. Середина

Адрес редакции: 119571, г. Москва, пр. Вернадского, 86, оф. Л-119 тел.: +7 (495) 246-05-55 (#2-88) e-mail: seredina@mirea.ru **Executive Editor:** Olga V. Esipova

Editorial: Prof. Tatyana M. Buslaeva Larisa G. Semernya Galina D. Seredina

Editorial Address: Vernadskogo pr., 86, Moscow, 119571 Russia phone: +7 (495) 246-05-55 (#2-88) e-mail: seredina@mirea.ru

www.rtj-mirea.ru

Сигов А.С. Главный редактор журнала, академик РАН, профессор, д.ф.-м.н., президент РТУ МИРЭА

Кудж С.А. Профессор, д.т.н., ректор РТУ МИРЭА

Банис Ю.Й. Профессор, хабилитированный доктор наук, проректор Вильнюсского университета, Литва

Боков А.А. Старший научный сотрудник, химический факультет и 4D LABS, Университет Саймона Фрейзера, Ванкувер, Британская Колумбия, Канада

Буслаева Т.М. Профессор, д.х.н., РТУ МИРЭА

Буш А.А. Профессор, д.т.н., директор Института материалов твердотельной электроники РТУ МИРЭА

Вахрушев С.Б. Профессор, д.ф.-м.н., зав. лабораторией нейтронных исследований Физикотехнического института им. А.Ф. Иоффе РАН, профессор кафедры Физической электроники СПбГПУ

Голованова Н.Б. Профессор, д.э.н., заместитель первого проректора РТУ МИРЭА

Гуляев Ю.В. Академик РАН, член Президиума РАН, профессор, д.ф.-м.н., научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Жуков Д.О. Профессор, д.т.н., зав. кафедрой интеллектуальных технологий и систем РТУ МИРЭА

Кимель А.В. Доцент, к.ф. - м.н., Университет Радбауд, г. Наймеген, Нидерланды

Козлов Г.В. Профессор, д.ф-м.н., заместитель руководителя аппарата генерального директора АО «Концерн ВКО "Алмаз-Антей"»

Кондратенко В.С. Профессор, д.т.н., зав. кафедрой оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА

Крамаров С.О. Профессор, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник Сургутского государственного университета

Минина Е.Д. Профессор, д.ф.-м.н., зав. специализированной учебно-научной лабораторией фемтосекундной оптики для нанотехнологий РТУ МИРЭА

Пасечник С.В. Профессор, д.ф.-м.н., профессор кафедры оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА

Перно Ф. Профессор, проректор по научной работе, Центральная Школа г. Лилль, Франция

Романов М.П. Профессор, д.т.н., директор Института кибернетики РТУ МИРЭА

Савиных В.П. Член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК)

Скотт Дж. Профессор, член Лондонского Королевского общества, Университет Кембриджа, Великобритания

Соколов В.В. Профессор, д.ф-м.н., советник по научной работе РТУ МИРЭА

Тимошенко А.В. Профессор, д.т.н., проректор по учебной работе РТУ МИРЭА

Фетисов Ю.К. Профессор, д.ф-м.н., профессор кафедры наноэлектроники РТУ МИРЭА

Харин Ю.С. Член-корреспондент НАН Беларуси, профессор, д.ф-м.н., директор Научноисследовательского института прикладных проблем математики и информатики Белорусского государственного университета, Беларусь

Цветков В.Я. Профессор, д.т.н., советник ректората РТУ МИРЭА

Alexander S. Sigov – Editor-in-Chief of the Journal, Academician of the Russian Academy of Sciences, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, President of RTU MIREA

Stanislav A. Kudzh - Professor, D.Sc. (Eng.), Rector of RTU MIREA

Yuras Banis – Professor, Habilitated Doctor of Sciences, Vice-Rector of Vilnius University, Lithuania Tatyana M. Buslaeva – Professor, D.Sc. (Chem.), RTU MIREA

Alexander A. Bush – Professor, D.Sc. (Eng.), Director of the Institute of Materials of Solid State Electronics, RTU MIREA

Sergey B. Vakhrushev – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Head of the Laboratory of Neutron Research, A.F. Ioffe Physico-Technical Institute RAS, Professor of the Department of Physical Electronics of SPbSPU

Nataliya B. Golovanova – Professor, D.Sc. (Economics), Deputy First Vice-Rector of RTU MIREA

Yury V. Gulyaev – Academician of the Russian Academy of Sciences, Member of the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Supervisor of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS

Dmitry O. Zhukov – Professor, D.Sc. (Eng.), Head of the Department of Intelligent Technologies and Systems, RTU MIREA

Alexey V. Kimel – Associate Professor, Ph.D. (Phys.-Math.), Radboud University, Nijmegen, Netherlands

Gennady V. Kozlov – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Deputy Head of the Office of the General Director of JSC Concern "VKO Almaz-Antey"

Vladimir S. Kondratenko – Professor, D.Sc. (Eng.), Head of the Department of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, RTU MIREA

Sergey O. Kramarov – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Surgut State University Elena D. Mishina – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Head of the Specialized Educational and Research Laboratory of Femtosecond Optics for Nanotechnologies, RTU MIREA

Sergey V. Pasechnik – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor of the Department

of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, RTU MIREA

Philippe Pernod – Professor, Dean of Research, Ecole Centrale de Lille, France

Mikhail P. Romanov – Professor, D.Sc. (Eng.), Director of the Institute of Cybernetics, RTU MIREA

Viktor P. Savinykh – Member-Correspondent of the Russian Academy of Sciences, Professor, D.Sc. (Eng.), President of Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Twice Hero of the Soviet Union

James F. Scott – Professor, Fellow of the Royal Society of London, Cambridge University, UK Viktor V. Sokolov – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Adviser on Scientific Work of RTU MIREA

Andrey V. Timoshenko – Professor, D.Sc. (Eng.), Vice Rector for Academic Affairs of RTU MIREA

Yury K. Fetisov – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Nanoelectronics, RTU MIREA

Yury S. Kharin – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Director of the Research Institute of Applied Problems of Mathematics and Informatics of the Belarusian State University, Belarus

Viktor Y. Tsvetkov – Professor, D.Sc. (Eng.), Councilor of the Administration of RTU MIREA

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. ИНФОРМАТИКА. ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Лесько С.А., Алёшкин А.С., Филатов В.В.

Стохастические и перколяционные модели динамики блокировки вычислительных сетей при распространении эпидемий эволюционирующих компьютерных вирусов

СОВРЕМЕННЫЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Беккиев А.Ю., Маковий В.А.	28			
Измерение параметров импульсных помех в пакетной радиолинии	20			
МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА.				
ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ				
Вигдорович Е.Н.	41			
Радиационная стойкость эпитаксиальных структур на основе GaAs				
Ильин Н.А., Климов А.А., Tiercelin N., Pernod P., Мишина Е.Д., Гапонов М.С., Брехов К.А., Сигов А.С., Преображенский В.Л. Динамика намагниченности в многослойных структурах TbCo/FeCo под действием фемтосекундного оптического возбуждения	50			
<i>Мокрушина А.А., Юрасов А.Н.</i> Особенности моделирования магниторефрактивного эффекта в многослойных металлических наноструктурах	59			
АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ				
Чукита В.И., Сенокосов Э.А., Фещенко В.С. Стенд для исследования позиционно-чувствительного фотоприемника	69			
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ				
<i>Карпов Д.А., Струченков В.И.</i> Динамическое программирование как метод сплайн-аппроксимации в САПР линейных сооружений	77			

INFORMATION SYSTEMS. INFORMATICS. PROBLEMS OF INFORMATION SECURITY

7

Lesko S.A., Alyoshkin A.S., Filatov V.V. Stochastic and percolating models of blocking computer networks dynamics during distribution of epidemics of evolutionary computer viruses

MODERN RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS

<i>Bekkiev A.Yu., Makoviy V.A.</i> Impulse noise parameter assessment in a batch radio channel				
MICRO- AND NANOELECTRONICS. CONDENSED MATTER PHYS	ICS			
<i>Vigdorovich E.N.</i> Radiation resistance of epitaxial structures based on GaAs	41			
Ilyin N.A., Klimov A.A., Tiercelin N., Pernod P., Mishina E.D., Gaponov M.S., Brekhov K.A., Sigov A.S., Preobrazhensky V.L. Dynamics of magnetization in multilayer TbCo/FeCo structures under the influence of femtosecond optical excitation	50			
<i>Mokrushina A.A., Yurasov A.N.</i> Features of modeling of the magnetorefractive effect in multilayered metal nanostructures	59			
ANALYTICAL INSTRUMENTATION AND TECHNOLOGY Chukita V.I., Senokosov E.A., Feshchenko V.S. The stand for research of positional-sensitive photosensor MATHEMATIC MODELING	69			
<i>Karpov D.A., Struchenkov V.I.</i> Dynamic programming as a method of spline approximation in the CAD systems of linear constructions	77			

УДК 519.21

DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-7-27

Стохастические и перколяционные модели динамики блокировки вычислительных сетей при распространении эпидемий эволюционирующих компьютерных вирусов

С.А. Лесько[@], А.С. Алёшкин, В.В. Филатов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия [@]Автор для переписки, e-mail: sergey@testor.ru

В работе представлена комплексная модель динамики развития эпидемий вирусов в компьютерных сетях, созданная на основе учета их топологических свойств и механизмов распространения вирусов. С одной стороны, данная модель основана на использовании методов теории перколяции, которые позволяют определить такие структурно-информационные характеристики сетей, как зависимость порога перколяции от среднего числа связей (приходящихся) на один узел (плотность сети). С другой стороны, рассматриваются динамические процессы стохастического распространения в компьютерных сетях эволюционирующих вирусов при устаревании и запаздывании действия антивирусов. В работе рассматривается понятие порога перколяции, приводится уравнение зависимости величины порога перколяции сети от её плотности, полученное в результате анализа данных численного моделирования. Динамика распространения вирусов разработана с использованием двух подходов: первый основан на описании диаграмм переходов между состояниями узлов, после чего строится система кинетических дифференциальных уравнений распространения вирусов; второй - на рассмотрении вероятностей переходов между возможными состояниями всей сети в целом. Получено дифференциальное уравнение второго порядка и сформулирована краевая задача, решение которой описывает зависимость вероятности блокирования сети от вероятности блокирования отдельного узла. Это решение позволяет также оценить время достижения порога перколяции. В модель заложены эволюционные свойства вирусов (ранее иммунизированные или вылеченные узлы через некоторый интервал времени могут быть снова инфицированы), и время запаздывания антивирусной защиты. Анализ полученных решений для созданных моделей показывает возможность существования различных режимов распространения вирусов. Подчеркнуть, что при некоторых наборах величин коэффициентов дифференциальных уравнений наблюдается осциллирующий и почти периодический характер распространения вирусных эпидемий, что в значительной степени совпадает с реальными наблюдениями.

Ключевые слова: модель эволюционирующих компьютерных вирусов, осциллирующая динамика эпидемий компьютерных вирусов, времена запаздывания, диаграммы переходов между состояниями узлов, стохастические процессы, порог перколяции сетей со случайной структурой.

Stochastic and Percolating Models of Blocking Computer Networks Dynamics during Distribution of Epidemics of Evolutionary Computer Viruses

Sergey A. Lesko[@], Anton S. Alyoshkin, Vyacheslav V. Filatov

MIREA – *Russian Technological University, Moscow 119454, Russia @Corresponding author e-mail: mailto:sergey@testor.ru*

The paper presents a complex model of the dynamics of virus epidemies propagation in computer networks, based on topological properties of computer networks and mechanisms of the viruses spread. On one hand, this model is based on the use of percolation theory methods, which makes it possible to determine such structural-information characteristics of networks as the dependence of the percolation threshold on the average number of connections per one node (network density). On the other hand, the dynamic processes of stochastic propagation in computer networks of evolving viruses are observed when anti-virus programs become outdated and postponed. The paper discusses the concept of percolation threshold, provides an equation for the dependence of the percolation threshold of a network on its density obtained by analyzing numerical simulation data. The dynamics of virus epidemies were studied through two approaches. The first one is based on the description of transition diagrams between states of nodes, after which a system of kinetic differential equations for the virus epidemies is constructed. The second is based on considering the probabilities of transitions between possible states of the entire network. A second-order differential equation is obtained in this article, and a boundary value problem is formulated. Its solution describes the dependence of the network blocking probability on the blocking probability of an individual node. The solution also makes it possible to estimate the time required to reach the percolation threshold. The model incorporates the evolutionary properties of viruses: previously immunized or disinfected nodes can be infected again after a certain time interval. Besides, the model incorporates a lag of the anti-virus protection. Analysis of the solutions obtained for the models created shows the possibility of various modes of virus propagation. Moreover, with some sets of values of differential equation coefficients, an oscillating and almost periodic nature of virus epidemies is observed, which largely coincides with real observations.

Keywords: computer model evolving viruses, oscillating dynamics of computer viruses epidemies, lag times, state transition graphs, stochastic processes, percolation threshold of networks with random topologies.

Введение

Развитие методов искусственного интеллекта уже сегодня позволяет создавать вирусы, которые могут эволюционировать и приспосабливаться к появлению новых антивирусных программ, что в значительной степени схоже с эволюцией биологических объектов. Не далек тот день, когда появится возможность автоматического создания в сетях новых вирусов, основанных на принципах эволюционного отбора и анализе текущих свойств среды их существования. Такие объекты будут обладать высокоразвитым искусственным интеллектом и демонстрировать роевое поведение. Построение моделей распространения подобных объектов для изучения и борьбы с ними представляет большой научный интерес.

Впервые кинетика развития вирусной эпидемии в адресном пространстве компьютерных сетей была проанализирована с помощью принятых в биологии простых феноменологических SI- и SIR-моделей [1–3]. Под SI-моделью распространения вирусов подразумевают, что любой из компьютеров, входящих в атакуемую сеть, может находиться в одном из двух состояний: уязвимом (S) и инфицированном (I). Согласно этой модели, имеется сеть, состоящая из постоянного числа (N) компьютеров, причем N = S + I, а на каждом инфицированном узле может существовать только одна копия червя (вируса), которая *случайным образом* с некоторой *постоянной средней скоростью* атак в единицу времени выбирает в доступном адресном пространстве потенциальную жертву. В модели SIR сетевые узлы существуют в трех состояниях: уязвимом (S), зараженном (I) и невосприимчивом (R). Отметим, что узлы оказываются неуязвимыми только после излечения от инфекции, а N – общее число узлов сети равно S + I + R. Вводя *постоянную среднюю скорость иммунизации и атак* в единицу времени для описания динамики развития эпидемий, получают системы дифференциальных кинетических уравнений [1–3], описывающих процесс распространения эпидемии вирусов.

Среди ранних работ стоит упомянуть также статью V. Misra и его коллег [4], которые для моделирования распространения вирусов применили гидродинамическую модель, описывающую указанный процесс как протекание жидкости.

Дальнейшее развитие ранее существовавшие кинетические SI- и SIR-модели получили в работах [5–7]. К примеру, в [5] рассмотрены два типа процессов в компьютерной сети: один – определяемый серверными инфицированными узлами сети, имеющими высокий темп интенсивности вредоносных атак, а другой – инфицированными узлами клиента, имеющими низкий темп интенсивности вредоносных атак. Инфекционные узлы сервера передают вирусы узлам клиента в компьютерной сети, которые, однако, могут излечиваться с течением времени, но при этом снова становятся восприимчивыми к заражению (правда, с меньшей вероятностью). По мнению авторов, это должно создавать эффективную неприкосновенность узлов после некоторого промежутка времени и обеспечивать автоматический защитный механизм от быстро размножающихся вирусов.

Для построения системы кинетических уравнений было выдвинуто предположение, что общее количество компьютерных узлов (N) можно разделить на две группы: N_H , которые имеют высокий темп интенсивности нападения (серверы), и N_L , которые имеют низкий темп интенсивности нападения (клиенты): $N_H + N_L = N$. Группа N_H , в свою очередь, состоит из трех классов: восприимчивые, но еще не зараженные (S_H), иммунизированные и невосприимчивые (A), заразные (I_H): $S_H + A + I_H = N_H$. Группа N_L состоит из четырех классов: восприимчивые (S_L), иммунизированные и невосприимчивые (E_L), заразные (I_L) и вылеченные (R_L): $S_L + E_L + I_L + RL = N_L$. Затем для перечисленных типов узлов была записана система, состоящая из семи кинетических дифференциальных уравнений первого порядка, описывающая переходы между состояниями узлов и их материальный баланс. Моделирование и анализ динамики заражения и равновесия состояний с помощью полученной системы уравнений и подбора в них величин соответствующих коэффициентов позволил сделать вывод: чтобы получить сеть, свободную от злонамеренных объектов, необходимо обновлять антивирус в нерегулярные интервалы времени, длительность которых определяется кинетическими свойствами вирусной эпидемии.

Предложена кинетическая модель описания развития вирусных эпидемий на основе решения системы трех дифференциальных уравнений первого порядка для баланса узлов, находящихся в уязвимом (S), зараженном (I) и невосприимчивом (R) состояниях [6]. Авторы работы развивают кинетические модели описания вирусных эпидемий в компьютерных сетях на основе представлений об эпидемиологическом пороге, времени ожидания заражения, факторе репликации (коэффициент размножения), вероятности заражения и иммунизации, времени неприкосновенности узла и т. д. В разработанной модели узел, удаленный из зараженного класса (иммунизированный), временно восстанавливается и получает с некоторой вероятностью неприкосновенность, либо он может с некоторой вероятностью снова заразиться. Численное решение полученной системы дифференциальных уравнений [6] показывает возможность развития вирусных эпидемий, имеющих ярко выраженный периодический характер.

На основе кинетических подходов усовершенствованы математические модели распространения компьютерных вирусов в гетерогенной компьютерной сети, учитывающие ее топологические и архитектурные особенности [7]. Обобщенная структура компьютерной сети рассматривалась на основе модели NSIDR: N = S(t) + I(t) + D(t) + R(t), где: N - общее количество объектов в системе; <math>S(t) - количество уязвимых объектов; <math>I(t) - количе-ство зараженных объектов; D(t) - количество объектов, в которых обнаружен вирус; <math>R(t) - количество вылеченных объектов, обладающих иммунитетом. Учет топологических и архитектурных особенностей сетей осуществлялся путем умножения некоторых членов кинетических дифференциальных уравнений на эмпирические поправочные коэффициенты. В частности, для топологии сети «звезда» член, учитывающий убыль (заражение) уязвимых объектов, умножался на коэффициент, равный 0.6. Анализ – на основе данных развития эпидемий – и сравнительные исследования предлагаемых математических моделей позволили сделать вывод о повышении их точности по сравнению с известными математическими моделями и возможности применения разработанных моделей для моделирования вирусных эпидемий в компьютерных сетях [7].

Общие вопросы развития эпидемий вирусов в компьютерных сетях рассмотрены в [8, 9]. В частности, указывается на необходимость разработки стратегий защиты, не уязвимых к изменениям в топологии сети и не требующих знания механизмов развития эпидемии [8]. Например, создание механизмов регулирования числа соединений между узлами в единицу времени и их ограничение при возникновении атак или разработка методов превентивной вакцинации. Обсуждается необходимость разработки контрмер, препятствующих распространению вирусов [9]. Высказывается мнение [9], что выпуск обновлений для программного обеспечения после обнаружения уязвимостей не дает надежной гарантии безопасности. Для повышения уровня защиты авторы [9] предлагают идею выделения в компьютерной сети подсети, в которой будет целенаправленно распространяться антивирус, и поведение этого антивируса будет близко к поведению вредоносного программного обеспечения. Задачей его станет борьба с вирусами, а не нанесение вреда («хороший вирус» с конкурирующей стратегией распространения). Распространение вирусов и антивирусов будет представлять два конкурирующих процесса, причем для распространения антивирусов возможна реализация двух механизмов: случайная иммунизация и целенаправленная конкурирующая стратегия. Моделирование показало [9], что целенаправленная конкурирующая стратегия борьбы с вирусами наиболее эффективно работает, если скорость распространения антивирусов превышает скорость заражения, а инфицированные узлы могут быть легко идентифицированы. Преимуществом целенаправленной конкурирующей стратегии является отсутствие зависимости ее эффективности от топологии распространения вирусов в компьютерной сети. На основе получаемого результата антивирусные компании смогут использовать социальную сеть своих клиентов или создать сеть из их компьютеров для распространения контрмеры (когда узлы сами могут распространять контрмеры).

Выполнен анализ четырех моделей распространения вирусов [10]: классическая SI-модель, независимая каскадная модель, динамическая модель распространения и модель, учитывающая топологию сетей. Сравнение результатов моделирования показало, что наиболее перспективными с точки зрения разработки механизмов защиты являются модели, основанные на графе сети.

В публикациях последних лет обсуждается разработка интеллектуальных моделей развития и описания вирусных эпидемий в компьютерных сетях, например, подходы, сходные с теорией клеточных автоматов. Так, в [11] рассматривается модель развития вирусной эпидемии не с произвольным порядком распространения вирусов, а с учетом погрешности результатов атак вследствие воздействия вирусов на уже зараженные узлы в сети. С этой целью авторы представляют сеть в виде направленного вероятностного графа (без петель), узлы которого описываются переменными, задающими вероятности их состояния (зараженный, иммунизированный, восприимчивый), а дуги задают взаимодействие между переменными модели. Вирусное распространение определяется характеристиками сети и аналогично действию клеточного автомата. Вирусы могут блуждать в произвольном порядке по пространству графа, иметь различные позиции и скорость. Их перемещение по узлам описывается набором правил. Восприимчивый узел заражается, когда на него попадает вирус; узел, который является носителем болезни, не может быть заражен второй болезнью (т. е. активная болезнь блокирует вторичную инфекцию); иммунизированный узел не может быть заражен повторно и т. д. Следует отметить, что предлагаемый авторами подход устраняет многие проблемы, существовавшие в более ранних эпидемиологических моделях.

Кроме того, очень активно развиваются модели на основе цепей Маркова. В частности, предлагается модель описания развития вирусных эпидемий на основе стохастических моделей интерактивных цепей Маркова [12], в которых состояние узлов сети на каждом следующем шаге развития эпидемии зависит от его состояния и состояния соседей на предыдущем шаге, а сама сеть представляется в виде ненаправленного графа. Использование цепей Маркова, по мнению авторов [12], позволяет оценить защищенность сетей с различной топологией от компьютерных вирусов и выбирать наиболее безопасные сетевые структуры уже на раннем этапе проектирования.

Анализ и моделирование эпидемий вирусов в компьютерных сетях можно осуществлять с использованием методов сопоставления. Например, в [13] для описания эпидемий двух червей и трояна: (wormnetsky.p, wormmytob.mr, trdir.stration.ge) использованы две различных модели: одна – на основе авторегрессионного анализа, другая – на основе Фурье-анализа. Авторегрессионный и Фурье-анализ дают возможность предсказания увеличения и/или уменьшения тенденций в распространении определенного типа вируса (при помощи накопленного по другим эпидемиям опыта). Результаты анализа показывали приемлемую корреляцию времени распространения вирусов между моделями. Разработанная методика позволяет, как полагают авторы [13], предсказывать и управлять уровнями заражения, заранее обеспечивая превентивные меры, увеличивая тем самым безопасность и надежность.

Важной задачей обеспечения надежности работы компьютерных и телекоммуникационных сетей и защиты информации в процессе ее передачи является изучение вопросов образования групп вычислительных узлов компьютерных сетей, физически связанных между собой каналами связи, но по тем или иным причинам блокированных, т. е. исключенных из работы (например, такое поведение возможно при распространении эпидемий компьютерных вирусов). При определенных условиях такие группы блокированных узлов могут увеличиваться в размерах и образовывать кластеры, что приведет к общей потере работоспособности сети по передаче данных. В силу исторически сложившихся обстоятельств любая вычислительная сеть, начиная с уровня района города, имеет нерегулярную случайную структуру. Наиболее ярким примером такой сети является Интернет. Эта нерегулярность определяется множеством факторов, среди которых следует выделить: наличие провайдеров с различным сетевым и коммуникационным оборудованием, переменное число абонентов, постоянно изменяющаяся топология подключения и т. п.

При описании топологии блокирования узлов сетей в случае распространения вирусов в настоящее время преобладает подход, согласно которому развитие эпидемии представляется в виде процесса, напоминающего по своей структуре дерево Кэйли со случайным числом связей [14]. Особое внимание можно обратить на работу [15], в которой описана задача определения вероятности заражения узлов в зависимости от удаленности узла от источника инфекции в сетях с различным масштабом и числом узлов. Топологическими параметрами здесь являлись масштаб и число узлов, однако разнообразие структур сетей в данных работах не исследовалось.

Рассматриваемая в [15] модель использует понятие *scale free graph*, который может иметь любое число узлов. Внешний вид такого графа с общим числом узлов 100 представлен на рис. 1а. Однако на определенном этапе зараженные узлы сети могут отправлять копии вирусов уже на инфицированные, и топология процесса будет иметь вид, представленный на рис. 1б и 1в.

С помощью модели *scale free graph* можно также рассмотреть динамику трафика передачи данных [16, 17], а также процессы иерархического роста сетевой структуры [18].

Очевидно, что если блокированных узлов будет не очень много, то между двумя произвольно выбранными не близлежащими узлами сохранится хотя бы один «открытый» путь (путь, состоящий из неблокированных узлов). Доля блокированных узлов, при которой сеть в целом потеряет работоспособность, назовем порогом перколяции, ниже его значения сеть является работоспособной, несмотря на то, что в ней есть некоторые узлы или их группы (кластеры), блокированные вирусами. Выше порога перколяции вся сеть целиком выключается и теряет работоспособность по передаче данных. Между двумя произвольно выбранными узлами нет ни одного «открытого» пути.

С целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик сетей и создания новых методов и методологий защиты компьютерных сетей и приложений большой научный и практический интерес для разработки топологии вычислительной сети, имеющей высокую отказоустойчивость, представляет исследование процессов образования кластеров блокированных узлов и перколяции данных в сетях, имеющих различную (в том числе, и случайную) топологию [19, 20].



Рис. 1. Общий вид *scale free graph* (а); вид графа зараженных узлов на более поздних этапах вирусной эпидемии (б) – начало процесса взаимных DDoS-атак; процесс взаимных DDoS-атак становится весьма существенным (в).

Для уточнения параметров моделей стоит обсудить два понятия:

• распространение по физическим каналам связи между узлами: два узла являются «соседями», если имеют прямой (без промежуточных посредников) канал связи;

• распространение по адресной связи между узлами: вирус может отправить свою копию не на физического «соседа», а на произвольно выбранный узел со случайным сетевым (IP) адресом.

Во втором случае топология развития вирусной эпидемии имеет вид дерева (сети) Кэйли со случайным числом связей, а в первом – структура физически связанных зараженных узлов будет иметь более сложный вид. Для установления взаимосвязи между процессами, происходящими в адресном и физическом пространствах сети, можно воспользоваться методами теории перколяции. Не исключено, что заражение узла вирусом приведет к его блокировке относительно обработки и передачи данных в компьютерной сети. Важно также отметить, что после 2001 г., когда произошли массовые эпидемии таких червей, как *CodeRed I, CodeRed II, Nimda, Slammer* и ряда других вирусов, выяснилось, что созданные к текущему моменту модели не всегда адекватно описывают процессы распространения вирусов по сети.

Перколяционные свойства сетевых структур

В теории перколяции изучают решения задачи узлов и задачи связей для сетей с различными регулярными (2D-структурами – треугольной, шестиугольной решетками, деревья Кейли и т. д. и 3D-структурами – гексагональной, кубической решетками и т. д.), а также нерегулярными, случайными структурами. Для решения задачи связей необходимо определить долю связей, которую нужно разорвать, чтобы сеть распалась минимум на две несвязанные части. В задаче узлов необходимо определить долю блокированных узлов, при которой сеть распадется на несвязанные между собой кластеры, внутри которых сохраняются связи. Другой вариант решения – это возможность определить долю проводящих узлов, когда возникает проводимость. Доля неблокированных узлов (в задаче узлов) или неразорванных связей (в задаче связей), при которой возникает проводимость между двумя произвольно выбранными узлами сети, называется порогом перколяции (протекания). Суть перколяционного процесса состоит в изменении общего состояния структуры (сеть работоспособна) на противоположное состояние (сеть не работоспособна) при изменении отдельных свойств элементов (узлов сети).

Понятие долей блокированных узлов или связей является эквивалентным понятию вероятности нахождения случайно выбранного узла (или связи) в блокированном (разорванном) состоянии. Поэтому можно принять, что величина порога перколяции определяет вероятность передачи информации через всю сеть в целом, если блокирована (исключена) некоторая часть ее узлов (или связей), т. е. задана средняя вероятность блокирования узла (разрыва связи). Достижение порога перколяции в сети соответствует кластеру, в котором есть связи между любыми его произвольными узлами (образуется так называемый бесконечный, или стягивающий кластер).

При передаче информации через сеть важным фактором является влияние числа и размера кластеров блокированных (или проводящих) узлов на проводимость сетевой структуры в целом. Применение методов теории перколяции к исследованию сетевых структур и протекающих в них процессов позволяет дать ответы на следующие вопросы [21–23]:

1) нахождение распределения кластеров блокированных узлов сетевой структуры по размерам при заданной вероятности их блокирования;

2) нахождение статистических характеристик кластеров, например, средний размер кластеров блокированных узлов сетевой структуры;

3) как зависит величина порога перколяции сетевой структуры от ее плотности (среднего числа связей, приходящихся на один узел).

Возникают и другие вопросы.

Чтобы построить граф сетевой структуры, рассмотрим следующую модель. Возьмем набор вершин графа (узлы сети – компьютеры, мобильные устройства, сетевое оборудование и т. д.), которые могут быть связаны между собой произвольным образом множественными связями (ребра графа – линии связи). Пример образования такой структуры, полученной путем численного моделирования зависимости порогов перколяции случайных сетей от среднего числа связей в расчете на один узел (плотности) сети, показан на рис. 2 [24, 25]. Решалась и задача блокирования узлов, и задача разрыва связей [23–25]. Проведено численное моделирование зависимости порогов перколяции случайных сетей от среднего числа связей в расчете на один узел (плотности) сети, для структуры, представленной на рис. 2 [23, 24].

Полученные для задачи блокирования узлов результаты для небольших плотностей сетей суммированы в таблице.



Рис. 2. Структура случайной сети передачи данных [25].

Величина порога перколяции для задачи блокирования узлов случайной сети с множеством путей между узлами [23, 24]

N⁰	Число связей для одного узла сети (плотность). В скобках приведе- ны значения величин обратной плотности	Величина порога перколяции (доля проводящих узлов, при которой возникает проводимость сети в целом). В скобках приведены значения величин натурального логарифма величины порога перколяции
1	2.36 (0.42)	0.52 (-0.65)
2	2.82 (0.35)	0.43 (-0.84)
3	3.29 (0.30)	0.37 (-0.99)
4	4.70 (0.21)	0.27 (-1.31)
5	4.75 (0.21)	0.25 (-1.39)
6	6.17 (0.16)	0.19 (-1.66)
7	6.75 (0.15)	0.18 (-1.71)
8	9.41 (0.11)	0.17 (-1.77)
9	10.02 (0.10)	0.15 (-1.90)

Для случайных структур, величины порогов перколяции которых представлены в таблице, зависимость их натурального логарифма ln P(x) от обратной величины плотности сети (1/x) может быть описана линейным уравнением [24]:

$$\ln P(x) = \frac{4.02}{x} - 2.26$$

(1)

с величиной коэффициента корреляции числовых данных и уравнения линейной зависимости, равной 0.97.

Полученную зависимость целесообразно использовать для вычисления величин порогов перколяции по величинам плотности сетей. Далее, используя динамическую модель, можно определить время достижения порога и выхода сети (в целом) из работоспособного состояния.

Модель стохастической динамики распространения в компьютерных сетях эволюционирующих вирусов при условии устаревания и запаздывания действия защиты

Теперь обратимся к рассмотрению модели стохастической динамики распространения в компьютерных сетях эволюционирующих вирусов при условии устаревания и

запаздывания действия защиты. Для построения модели стохастической кинетики распространения эволюционирующих (приспосабливающихся или видоизменяющихся под среду) вирусов и кластеризации блокированных узлов компьютерных сетей в адресном пространстве мы разработали и предлагаем следующий подход.

Рассмотрим сеть, в которой происходит процесс распространения вирусов. Он начинается раньше, чем появятся эффективные способы организационного и технического противодействия (антивирусная защита имеет время запаздывания). Долю узлов сети, находящихся в момент времени *t* в зараженном состоянии, обозначим как $y_1(t)$; в защищенном (иммунизированном) состоянии – $y_2(t)$; в нейтральном состоянии (не инфицирован, не защищен и может быть заражен) обозначим, как $y_3(t)$. Общее число узлов сети примем равным *L*.

В начальный момент времени (t = 0) имеется некоторое количество (или доля $y_1(t = 0)$) зараженных узлов, которые могут рассылать копии вирусов по узлам сети, случайно выбирая их в адресном пространстве. Кроме того, имеется некоторое число узлов сети (или доля $y_2(t=0)$), которые занимаются борьбой с вирусами (излечивают зараженные и иммунизируют свободные узлы), рассылая копии антивирусов (полезные вирусы) по узлам сети, также случайным образом выбирая их в адресном пространстве, а также $y_2(t = 0)$ – это узлы в нейтральном состоянии (не инфицирован, не защищен и может быть заражен). Антивирусы могут устаревать, вследствие чего ранее иммунизированные узлы могут быть вновь инфицированы. Введем следующие времена: τ_1 – запаздывания действия антивируса, τ_2 – устаревания антивируса (то есть узел становится уязвим для новых видов вирусов спустя некоторое время после иммунизации, что во многом отражает реально существующее положение дел). Необходимо отметить, что если рассматривать модели, в которых рассылка вирусов происходит целенаправленным образом [26] с учетом ранее выбранных узлов в адресном пространстве и интеллектуальных стратегий поведения, то захват сети должен происходить быстрее, так как при случайной рассылке, на завершающем этапе развития эпидемий начинаются взаимные DDoS-атаки инфицированных узлов. Однако в предлагаемой нами модели происходит и процесс иммунизации за счет рассылки антивирусов. Поскольку распространение вирусов и антивирусов является независимым, то, на наш взгляд, для их распространений следует выбирать механизм случайной рассылки.

Описанный нами процесс стохастической кинетики распространения эволюционирующих вирусов в компьютерной сети опишем диаграммой, представленной на рис. 3, и системой кинетических уравнений, приведенной ниже.

$$\frac{dy_1(t)}{dt} = ay_1(t)y_3(t) - by_1(t)y_2(t - \tau_1)$$
(2)

$$\frac{dy_2(t)}{dt} = cy_2(t - \tau_1)y_3(t) + by_1(t)y_2(t - \tau_1) - ky_2(t - \tau_2)$$
(3)

$$\frac{dy_3(t)}{dt} = -ay_1(t)y_3(t) - cy_2(t-\tau_1)y_3(t) + ky_2(t-\tau_2)$$
(4)



Рис. 3. Диаграмма, описывающая рассматриваемую модель процесса распространения вирусов в компьютерной сети.

Производные по времени определяют скорости изменения долей соответствующих узлов; a; b; c и k – некоторые коэффициенты, характеризующие соответствующие переходы на рис. 1 (эти коэффициенты являются интегральными параметрами, зависящими, например, от числа копий рассылаемых вирусов и антивирусов, вероятности встречи и т. д.). Перемножение различных функций (например, $y_1(t) \cdot y_3(t)$) характеризует вероятность соответствующих встреч.

Чтобы пояснить предлагаемую модель, рассмотрим более подробно одно из кинетических уравнений, например, уравнение (3). Член уравнения $\frac{dy_2(t)}{dt}$ описывает скорость изменения доли узлов, находящихся в защищенном (иммунизированном) состоянии, $cy_2(t - \tau_1)y_3(t)$ – определяет прирост за счет иммунизации уязвимых узлов, $by_1(t)y_2(t - \tau_1)$ – определяет прирост за счет излечивания зараженных узлов, $ky_2(t - \tau_2)$ – убыль за счет устаревания антивируса (иммунизированный узел может сначала переходить в незащищенное состояние, а затем заражаться вирусом). Аналогичным образом определяются смысловые значения членов кинетических уравнений (2) и (4).

Достижение порога перколяции сети в модели стохастической динамики распространения в компьютерных сетях эволюционирующих вирусов при условии устаревания и запаздывания действия защиты

Рассмотрим взаимосвязь между долями зараженных, иммунизированных и уязвимых узлов ($y_1(t)$, $y_2(t)$ и $y_3(t)$) при распространении эволюционирующих вирусов в сетях передачи данных и достижении порога перколяции (критической доли зараженных или блокированных узлов). Для обсуждения выберем в качестве примера компьютерную сеть, имеющую случайную структуру, в которой на один узел в среднем может приходиться от 2.5 до 4.0 связей. В соответствии с проведенными по уравнению ln P(x) = 4.02/x - 2.26 расчетами, общая доля зараженных узлов, при которой сеть потеряет работоспособность, в целом должна составлять от 0.52 (при 2.5 связей на узел порог перколяции равен 0.52) до 0.64 (при 4.0 связей на узел порог перколяции 0.64).

На рис. 4 представлены результаты решения системы уравнений (2)–(4) с взятыми в качестве примера следующими значениями коэффициентов: a = 0.003; b = 0.0015; c = 0.0001 и k = 0.1, общим числом узлов сети, равным 1000, временами запаздывания и устаревания $\tau_1 = 38$ и $\tau_2 = 12$ условных единиц, начальными значениями $y_3(t = 0) = 1000$, $y_2(t = 0) = 1$, $y_1(t = 0) = 10$. В данном случае доля зараженных узлов в стационарном состоянии будет достигать 0.64 (кривая 1).



Рис. 4. Кинетика взаимных переходов между узлами компьютерной сети и порог перколяции при распространении эпидемий эволюционирующих вирусов при коэффициентах переходов a = 0.003; b = 0.0015; c = 0.0001; k = 0.1.

Сохранение работоспособности сети в целом возможно при условии, чтобы среднее число связей на один ее узел составляло более 4-х (что технологически является нереализуемым в реальной сети с точки зрения стоимостных затрат). Если реализовывать топологии, в которых среднее число связей на один узел будет составлять около 2.5–3.0, то порог перколяции (или возможная доля блокированных узлов) будет иметь величину 0.5. Используя данное значение порога перколяции, можно решить обратную кинетическую задачу и определить необходимые для обеспечения заданного порога перколяции величины коэффициентов: *a, b, c, k* и времена запаздывания и устаревания τ_1 и τ_2 . В свою очередь, на основании вычисленных параметров модели может быть задана необходимая надежность, определяемая вероятностями переходов.

Из рис. 4 видно, что доля узлов, находящихся в стационарном защищенном (иммунизированном) состоянии (кривая 2) будет равна 0.32, а доля узлов, находящихся в стационарном нейтральном состоянии (не инфицирован, не защищен и может быть заражен), соответственно, равна 0.04 (кривая 3).

Стохастическая модель блокировки узлов сети и время достижения порога перколяции

Разработанная стохастическая модель блокировки узлов может быть обобщена на уровень сети в целом и связана с результатами, получаемыми в рамках теории перколяции. Для этого нами разработана следующая модель блокировки сети. Предположим, что в некоторый момент времени *t* доля блокированных (вследствие перегрузок или заражения вирусами) узлов сети передачи данных составляет некоторую величину x_i , которую будем называть состоянием сети. Состояние, наблюдаемое в момент времени *t* обозначим как x_i ($x_i \in X$). Кроме того, введем интервал времени τ_0 , за который возможно изменение состояния x_i . В данном случае любое значение текущего времени $t = h \cdot \tau_0$, где h – номер шага перехода между состояниями (процесс перехода между состояниями становится квазинепрерывным с бесконечно малым временным интервалом τ_0), h = 0, 1, 2, 3, ..., N. Текущее состояние x_i на шаге h после перехода на шаге h + 1 может увеличиваться на некоторую величину ε или уменьшаться на величину ξ и, соответственно, оказаться равным $x_i + \varepsilon$ или $x_i - \xi$. Величины ε и ξ принадлежат области определения x_i и являются па-

раметрами моделируемых процессов. Кроме того, на $x_i + \varepsilon$ и $x_i - \xi$ необходимо наложить ограничения: $x_i + \varepsilon \leq K_1$ (K_1 – верхняя граница множества X) и $x - \varepsilon \geq K_2$ (K_2 – нижняя граница множества X). В самом простом случае ε и ξ являются некоторыми постоянными величинами для любого шага h.

Введем понятие вероятности нахождения системы в том или ином состоянии. Пусть после некоторого числа шагов *h* про описываемую систему можно сказать, что:

- $P(x \varepsilon, h)$ вероятность того, что она находится в состоянии $(x \varepsilon)$;
- P(x, h) вероятность того, что она находится в состоянии *x*;
- $P(x + \xi, h)$ вероятность того, что она находится в состоянии $(x + \xi)$.

После каждого шага состояние x_i (далее индекс *i* для краткости опускаем) может изменяться на величину є или ξ . Вероятность P(x, h + 1) того, что на следующем (h + 1)-ом шаге система (или процесс) окажется в состоянии *x*, будет равна (рис. 5):

$$P(x, h+1) = P(x-\varepsilon, h) + P(x+\xi, h) - P(x, h)$$



Рис. 5. Схема возможных переходов между состояниями системы (или процесса) на (h + 1)-ом шаге.

Поясним уравнение (5) и представленную на рис. 5 схему. Вероятность перехода в состояние x на шаге h + 1 - P(x, h + 1) – определяется суммой вероятностей переходов в это состояние из состояний $(x - \varepsilon) - P(x - \varepsilon, h)$ и $(x + \xi) - P(x + \xi, h)$, в которых находилась система на шаге h за вычетом вероятности перехода (P(x,h)) системы из состояния x (в котором она находилась на шаге h) в любое другое состояние на (h + 1)-ом шаге. Будем считать, что сами переходы осуществляются с вероятностью, равной 1.

Учитывая, что $t = h \cdot \tau_0$, где t – время процесса, h – номер шага, τ_0 – длительность одного шага, можно перейти от $h \kappa t$. Разложим уравнение (5) в ряд Тейлора вблизи точки x и, учитывая не более, чем вторые производные, получим (6):

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} + \frac{\tau_0}{2} \frac{\partial^2 P(x,t)}{\partial t^2} + \dots = \frac{\xi - \varepsilon}{\tau_0} \frac{\partial P(x,t)}{\partial x} + \frac{\varepsilon^2 + \xi^2}{2\tau_0} \frac{\partial^2 P(x,t)}{\partial x^2}$$
(6)

Член уравнения вида $\frac{\partial P(x,t)}{\partial t}$ определяет общее изменение состояния системы или процесса с течением времени; член уравнения вида $\frac{\partial^2 P(x,t)}{\partial t^2}$ – описывает процесс, при котором состояния сами становятся источниками других состояний (его надо исключить). Член уравнения вида $\frac{\partial P(x,t)}{\partial x}$ – описывает упорядоченный переход либо в состояние, когда оно увеличивается ($\varepsilon > \xi$), либо, когда оно уменьшается ($\varepsilon < \xi$); член уравнения вида $\frac{\partial^2 P(x,t)}{\partial x^2}$ описывает случайное изменение состояния.

(5)

Таким образом:

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 P(x,t)}{\partial x^2} - b \frac{\partial P(x,t)}{\partial x}$$
(7)
rge $a = \frac{\varepsilon^2 + \xi^2}{2\tau_0}$ u $b = \frac{\varepsilon - \xi}{\tau_0}$.

Сформулируем и решим для описания работы сети краевую задачу с учетом перколяционных свойств. При числе блокированных узлов в сети x = l работа будет прекращена (l - величина порога перколяции сети). В связи с тем, что мы стремимся избежать этого состояния, необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$g(x, t)_{x=1} = 0 \tag{8a}$$

Состояние x = 0 означает, что в сети нет блокированных узлов. Однако учитывая, что число блокированных узлов не может выходить в область отрицательных значений, мы должны использовать при x = 0 условие отражения:

$$g(x, t)_{x=0} = 0 \tag{8b}$$

Поскольку в момент времени t = 0 в сети уже может быть некоторое число x_0 блокированных узлов, то начальное условие зададим в виде:

$$g(x,t=0) = \delta(x-x_0) = \begin{cases} \int \delta(x-x_0) dx = 1, x = x_0 \\ 0, \neq x_0 \end{cases},$$

Тогда решение уравнения (7), оставаясь непрерывным в точке $x = x_0$, будет испытывать в ней разрыв производной. Решение для g(x, t) разбивается на две области при $x > x_0$ и при $x \le x_0$.

Используя методы операционного исчисления для плотности вероятности g(x, t) обнаружения состояния системы в одном из значений на отрезке от 0 до 1 получаем следующую систему уравнений:

 Π ри $x > x_0$

$$g_1(x,t) = \frac{2}{l}e^{-\frac{(x_0 - x) + \frac{bt}{2}}{2a}} \sum_{n=1}^{M} (-1)^n \sin\left(\pi n \frac{x_0}{l}\right) \sin\left(\pi n \frac{l - x}{l}\right) e^{-\frac{\pi^2 n^2 at}{l^2}}$$
(9)

При $x \le x_0$

$$g_{2}(x,t) = \frac{2}{l}e^{-\frac{(x_{0}-x)+\frac{bt}{2}}{\frac{2a}{b}}}\sum_{n=1}^{M}(-1)^{n}\sin\left(\pi n\frac{x}{l}\right)\sin\left(\pi n\frac{l-x_{0}}{l}\right)e^{-\frac{\pi^{2}n^{2}at}{l^{2}}}$$
(10)

И интеграл P(l, t):

$$P(l,t) = \int_{0}^{x_{0}} g_{2}(x,t)dx + \int_{x_{0}}^{l} g_{1}(x,t)dx$$
(11)

будет задавать вероятность того, что состояние системы к моменту времени *t* находится на отрезке от 0 до 1, т. е. *порог перколяции l* не будет достигнут, и сеть не окажется бло-кированной (продолжит выполнять функции передачи данных).

Соответственно, вероятность $Q_i(l, t)$ того, что *порог перколяции l* окажется к моменту времени t достигнутым или превзойденным, можно определить следующим образом:

$$Q(l,t) = 1 - P(l,t)$$
(12)

Если мы возьмем произвольное значение x_0 , ε и ξ ($\varepsilon > \xi$), например $x_0 = 0.05$, $\varepsilon = 0.015$ и $\xi = 0.007$, то можем построить зависимость достижения порога перколяции от времени. На рис. 6 представлена такая зависимость (от времени вероятности $Q_i(l, t)$ того, что к моменту времени *t* окажется достигнутым порог перколяции).



Рис. 6. Зависимость значения вероятности достижения порога перколяции сети от времени. Кривая 1 построена для значения порога перколяции сети $l_1 = 0.30$, кривая $2 - для l_2 = 0.40$, кривая $3 - для l_3 = 0.50$ и кривая $4 - для l_4 = 0.60$.

Полученные результаты можно связать с результатами рассмотрения перколяционной модели. Пересечение горизонтальной линии на рис. 6 с кривыми линиями, описывающими поведение вероятностей, позволяет определить время достижения порога перколяции при заданных параметрах моделирования, а, следовательно, и потерю работоспособности всей сети. Для кривой 1 оно составит порядка 28.0 условных единиц; для кривой 2 – 40.5; кривой 3 – 52.5 и для кривой 4 – 65.0 условных единиц.

Заключение и выводы

1. Для установления взаимосвязи между процессами, происходящими в адресном и физическом пространствах сети целесообразно воспользоваться методами теории перколяции. В сетях передачи данных реализуются различные процессы: блокирование узлов, образование кластеров блокированных узлов, достижение такой количественной доли, при которой вся сеть целиком теряет работоспособность (достижение порога перколяции), несмотря на то, что значительная часть узлов все еще находится в рабочем состоянии. При среднем числе связей на один узел сети передачи данных в диапазоне значе-

ний от 2.5 до 3.5 доля неблокированных узлов, при которой сеть еще сохраняет общую работоспособность, должна иметь значения от 0.52 до 0.37. Используя данные значения порогов перколяции, можно решить обратную кинетическую задачу и определить необходимые для обеспечения заданного порога перколяции величины коэффициентов в стохастической кинетической модели распространения эволюционирующих вирусов. В свою очередь, на основании вычисленных параметров модели может быть задана необходимая надежность оборудования и программного обеспечения работы сетей, определяемая вероятностями переходов в кинетической модели.

2) Рассмотрена новая модель распространения эволюционирующих вирусов: эволюционные свойства вирусов учитываются в модели формальным правилом, согласно которому ранее иммунизированные или вылеченные узлы, через некоторый интервал времени (величина которого является параметром модели), могут быть снова инфицированы, а воздействие антивирусной защиты имеет время запаздывания (которое также является параметром модели). В рамках предлагаемой модели принято, что любой узел сети может находиться в одном из трех состояний: в защищенном (иммунизированном) состоянии, когда он сам рассылает антивирусы (излечивает зараженные и иммунизирует свободные узлы) по узлам сети, случайным образом выбирая их в адресном пространстве (стохастичность поведения); в зараженном состоянии (может рассылать копии вирусов по узлам сети, случайно выбирая их в адресном пространстве, также, стохастичность поведения), и в нейтральном состоянии (может быть заражен).

3) Модель стохастической динамики распространения эволюционирующих вирусов в компьютерной сети описывается в графическом виде с помощью диаграммы возможных переходов между состояниями узлов. Такая запись позволила получить систему кинетических дифференциальных уравнений, описывающих указанные процессы. Анализ полученных решений показывает возможность существования в рамках модели различных режимов распространения вирусов, причем для некоторых наборов величин коэффициентов дифференциальных уравнений наблюдается осциллирующий и почти-периодический характер распространения вирусных эпидемий, что в значительной степени совпадает с реальными наблюдениями.

4) Разработанная на основе кинетических дифференциальных уравнений модель может быть модифицирована и расширена через создание более сложных графических диаграмм изменения состояний и переходов между ними. В частности, это позволяет дополнить систему кинетических уравнений членом, учитывающим общий рост числа пользователей и устройств в компьютерных сетях с течением времени (такой рост, в принципе, описывается функцией любого вида).

5) При описании процесса распространения вирусных эпидемий в вычислительных сетях можно рассматривать совокупность случайных переходов между состояниями всей сети в целом (изменение числа блокированных и разблокированных узлов). Такая формализация позволяет вывести дифференциальное уравнение второго порядка (типа уравнения Колмогорова), описывающее стохастическую динамику изменения состояний как отдельных узлов, так сети в целом. Полученные уравнения для описания динамики стохастического изменения состояний узлов и сети в целом позволяют сформулировать и решить краевые задачи изменения загруженности и блокировки сети, во взаимосвязи

с результатами, получаемыми из перколяционных моделей (например, определить время потери работоспособности сети).

6) Практические рекомендации для защиты любых сетей от угроз вирусных атак заключаются в том, что в случае использования однотипного оборудования и программного обеспечения для создания сетей передачи данных, имеющих среднее число связей в расчете на один узел сети от 2.5 до 3.5, доля такого оборудования должна находиться в пределе от 0.48 (если блокируется 48% используемого оборудования, то все еще выполняется условие перколяции, так как доля не блокированных узлов равна 0.52) до 0.63 (превышать 48–63%). При этом нижняя граница отвечает за эффективное использование ресурсов, а верхняя – за предельно допустимые риски.

Литература:

1. Anderson H., Britton T. Stochastic Epidemic Models and Their Statistical Analysis. NY: Springer-Verlag New-York, Inc., 2000. 133 p.

2. Earn David J.D., Rohani Pejman, Bolker Benjamin M., Grenfell Bryan T. A simple model for complex dynamical transitions in epidemics // Science. 2000. V. 287. P. 667–670. DOI: 10.1126/science.287.5453.667

3. Wang C., Knight J. C., Elder M. C. Impact of network structure on malware propagation: A growth curve perspective // J. Manag. Inform. Syst. 2016. V. 33. № 1. P. 296–325. DOI: 10.1080/07421222.2016.1172440

4. Misra V., Gong W., Towsley D. Fluid-based analysis of a network of AQM routers supporting TCP flows with an application to RED // ACM/SIGCOMM Computer Commun. Rev. 2000. V. 30(4). P. 151–160. DOI: 10.1145/347059.347421

5. Kumar M., Kumar M.B., Panda T.C. A new model on the spread of malicious objects in computer network // Int. J. Hybrid Inform. Technol. 2013. V. 6. № 6. P. 161–176. DOI: 10.14257/ijhit.2013.6.6.14

6. Kumar M.B., Mursalin A.G. Differential epidemic model of virus and worms in computer network // Int. J. Network Security. 2012. V. 14. № 3. P. 149–155.

7. Семенов С.Г., Давыдов В.В. Математическая модель распространения компьютерных вирусов в гетерогенных компьютерных сетях автоматизированных систем управления технологическим процессом // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ". 2012. № 38. С. 163–171.

8. Balthrop J., Forrest S., Newman M.E.J., Williamson M.M. Technological networks and the spread of computer viruses // Science. 2004. V. 304. P. 527–529. DOI: 10.1126/ science.1095845

9. Chen Li-Chiou, Carley K.M. The impact of countermeasure propagation on the prevalence of computer viruses // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. Part B: Cybernetics. 2004. V. 34. № 2. P. 823–833.

10. Ojugo A.A., Aghware F.O., Yoro R.E., Yerokun M.O., Eboka A.O., Anujeonye C.N., Efozia F.N. Evolutionary model for virus propagation on networks // Automation, Control and Intelligent Systems. 2015. V. 3(4). P. 56–62. doi: 10.11648/j.acis.20150304.12

11. Vălean H., Pop A., Avram C. Intelligent model for virus spreading // Proceed. of the Int. Symp. on System Theory, Automation, Robotics, Computers, Informatics, Electronics and

Instrumentation. SINTES 13. 18-20 October 2007, Craiova, Romania. P. 117–122.

12. Далингер Я.М., Бабанин Д.В., Бурков С.М. Математические модели распространения вирусов в компьютерных сетях различной структуры // Моделирование систем. 2011. № 4(30). С. 3–11.

13.Piqueira Jos'e R.C., Cesar F.B. Dynamical models for computer viruses propagation // Mathem. Problems in Engineering. Volume 2008. Article ID 940526. 11 pages. doi:10.1155/2008/940526.

14. Nazario J. Defense and Detection Strategies against Internet Worms. Artech House Publ., 2004. 319 p.

15. Pastor-Satorras R., Vespignani A. Epidemics and immunization in scale-free networks / In: Handbook of Graphs and Networks: From the Genome to the Internet / S. Bornholdt and H. G. Schuster (eds.). Wiley-VCH, 2005. DOI: 10.1002/3527602755.ch5.

16. Fekete A., Vattay G., Kocarev L. Traffic dynamics in scale-free networks // Complexus. 2006. V. 3. P. 97–107. DOI: 10.1159/000094192.

17. Wu Zhi-Xi, Peng G., Wong Wing-Ming, Yeung Kai-Hau. Improved routing strategies for data traffic in scale-free networks // J. Statist. Mechanics: Theory and Experiment. 2008. P11002. DOI:10.1088/1742-5468/2008/11/P11002.

18. Boccaletti S., Hwang D.-U., Latora V. Growing hierarchical scale-free networks by means of nonhierarchical processes // Int. J. Bifurcation and Chaos. 2007. V. 17. № 7. P. 2447–2452. DOI:10.1142/S0218127407018518.

19. Zhukov D., Lesko S., Lobanov D. Modeling of open network reliability including the Internet based on the theory of percolation in two-dimensional and three-dimensional regular and random network structures // Proceed. of the Int. Conf. "Internet Computing and Big Data" (ICOMP'14) - WORLDCOMP'14; 2014. V. 3. P. 132–136.

20. Zhukov D., Lesko S. The percolation theory based analysis of data transmission reliability via data communication networks with random structure and kinetics of nodes blocking by viruses // ICNS 2015: Proceed. of the Eleventh Int. Conf. on Networking and Services. May 24-29, 2015. Rome, Italy. P. 24–30.

21. Sahini M., Sahimi M. Applications of Percolation Theory. CRC Press, 2003. 276 p.

22. Stauffer D., Aharony A. Introduction to Percolation Theory. London: Tailor & Francis, 2003. 192 p.

23. Тарасевич Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы. М.: УРСС, 2002. 112 с.

24. Zhukov D., Khvatova T., Lesko S., Zaltsman A. Managing social networks: applying the Percolation theory methodology to understand individuals' attitudes and moods // Technol. Forecasting and Social Change. 2018. V. 12. P. 297–307. DOI: 10.1016/j.techfore.2017.09.039

25. Zhukov D.O., Khvatova T.Yu., Lesko S.A., Zaltsman A.D. The influence of the connections density on clusterisation and percolation threshold during information distribution in social networks // Informatics and its Applications. 2018. V. 12. Iss. 2. P. 90–97. DOI: 10.14357/19922264180123

26. Жуков Д.О., Гусаров А.Н., Косырева А.В. Исследование эффективных стратегий распространения компьютерных угроз // Вестник компьют. и информ. технологий. 2010. № 7(73). С. 40–46.

References:

1. Anderson H., Britton T. Stochastic Epidemic Models and Their Statistical Analysis. NY: Springer-Verlag, New-York, Inc., 2000. 133 p.

2. Earn David J.D., Rohani Pejman, Bolker Benjamin M., Grenfell Bryan T. A simple model for complex dynamical transitions in epidemics. *Science*. 2000; 287:667-670. DOI: 10.1126/science.287.5453.667

3. Wang C., Knight J. C., Elder M. C. Impact of network structure on malware propagation: A growth curve perspective. *J. Manag. Inform. Syst.* 2016; 33(1):296-325. DOI: 10.1080/07421222.2016.1172440

4. Misra V., Gong W., Towsley D. A fluid based analysis of a network of AQM routers supporting TCP flows with an application to RED. *ACM/SIGCOMM Computer Commun. Rev.* 2000; 30(4):151-160. DOI: 10.1145/347059.347421

5. Kumar M., Kumar M.B., Panda T.C. A new model on the spread of malicious objects in computer network. *Int. J. Hybrid Inform. Technol.* 2013; 6(6):161-176. DOI: 10.14257/ ijhit.2013.6.6.14

6. Kumar M.B., Mursalin A.G. Differential epidemic model of virus and worms in computer network. *Int. J. Network Security.* 2012; 14(3):149-155.

7. Semenov S.G., Davydov V.V. Mathematical model of computer virus distribution in heterogeneous computer networks of automated process control systems. *Vestnik NTU "KhPI"* (Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"). 2012; 38:163-171. (in Russ.)

8. Balthrop J., Forrest S., Newman M.E.J., Williamson M.M. Technological networks and the spread of computer viruses. *Science*. 2004; 304:527-529. DOI: 10.1126/science.1095845

9. Chen Li-Chiou, Carley K.M. The impact of countermeasure propagation on the prevalence of computer viruses. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. Part B: Cybernetics.* 2004; 34(2):823-833.

10. Ojugo A.A., Aghware F.O., Yoro R.E., Yerokun M.O., Eboka A.O., Anujeonye C.N., Efozia F.N. Evolutionary model for virus propagation on networks. *Automation, Control and Intelligent Systems.* 2015; 3(4):56-62. doi: 10.11648/j.acis.20150304.12

11. Vălean H., Pop A., Avram C. Intelligent model for virus spreading. Proceed. of the Int. Symp. on System Theory, Automation, Robotics, Computers, Informatics, Electronics and Instrumentation. SINTES 13. 18-20 October 2007, Craiova, Romania. P. 117-122.

12. Dalinger Ya.M., Babanin D.V., Burkov S.M. The mathematical models of the spreading of viruses in computer networks with the different structures. *Informatika i sistemy upravleniya* (Information Science and Control Systems). 2011; 4(30):3-11. (in Russ.)

13. Piqueira Jos'e R.C., Cesar F.B. Dynamical models for computer viruses propagation. *Mathem. Problems in Engineering.* Volume 2008; Article ID 940526: 11 pages. doi:10.1155/2008/940526.

14. Nazario J. Defense and Detection Strategies against Internet Worms. Artech House Publ., 2004. 319 p.

15. Pastor-Satorras R., Vespignani A. Epidemics and immunization in scale-free networks. In: Handbook of Graphs and Networks: From the Genome to the Internet. S. Bornholdt and H. G. Schuster (eds.). Wiley-VCH, 2005. DOI: 10.1002/3527602755.ch5. 16. Fekete A., Vattay G., Kocarev L. Traffic dynamics in scale-free networks. *Complexus*. 2006; 3: 97-107. DOI: 10.1159/000094192.

17. Wu Zhi-Xi, Peng G., Wong Wing-Ming, Yeung Kai-Hau. Improved routing strategies for data traffic in scale-free networks. *J. Statist. Mechanics: Theory and Experiment.* 2008; P11002. DOI:10.1088/1742-5468/2008/11/P11002.

18. Boccaletti S., Hwang D.-U., Latora V. Growing hierarchical scale-free networks by means of nonhierarchical processes. *Int. J. Bifurcation and Chaos.* 2007; 17(7):2447-2452. DOI:10.1142/S0218127407018518.

19. Zhukov D., Lesko S., Lobanov D. Modeling of open network reliability including the Internet based on the theory of percolation in two-dimensional and three-dimensional regular and random network structures. Proceed. of the Int. Conf. "Internet Computing and Big Data" (ICOMP'14) - WORLDCOMP'14; 2014; 3:132-136.

20. Zhukov D., Lesko S. The percolation theory based analysis of data transmission reliability via data communication networks with random structure and kinetics of nodes blocking by viruses. ICNS 2015: Proceed. of the Eleventh Int. Conf. on Networking and Services. May 24-29, 2015. Rome, Italy. P. 24-30.

21. Sahini M., Sahimi M. Applications of Percolation Theory. CRC Press, 2003. 276 p.

22. Stauffer D., Aharony A. Introduction to Percolation Theory. London: Tailor & Francis, 2003. 192 p.

23. Tarasevich Yu.Yu. Percolation: theory, applications, algorithms. M.: Editorial URSS, 2002. 112 p. (in Russ.)

24. Zhukov D., Khvatova T., Lesko S., Zaltsman A. Managing social networks: applying the Percolation theory methodology to understand individuals' attitudes and moods. *Technol. Forecasting and Social Change*. 2018; 129:297-307. DOI: 10.1016/j.techfore.2017.09.039

25. Zhukov D.O., Khvatova T.Yu., Lesko S.A., Zaltsman A.D. The influence of the connections density on clusterisation and percolation threshold during information distribution in social networks. *Informatics and its Applications*. 2018; 12(2):90-97. DOI: 10.14357/19922264180123

26. Zhukov D.O., Gusarov A.N., Kosyreva A.V. Computer threats distribution effective strategy research. *Vestnik komp'yuternykh i informasionnykh tekhnologij* (Herald of Computer and Information Technologies). 2010; 7 (73):40-46. (in Russ.)

Об авторах:

Алёшкин Антон Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационное противоборство» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Филатов Вячеслав Валерьевич, кандидат технических наук, заместитель заведующего кафедрой «Управление и моделирование систем» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Лесько Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и моделирование систем» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Sergey A. Lesko, Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the Chair "Management and Modeling of Systems", Institute of Integrated Security and Special Instrumentation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Anton A. Alyoshkin, Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the Chair "Information Confrontation", Institute of Integrated Security and Special Instrumentation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Vyacheslav V. Filatov, Ph.D. (Engineering), Deputy Head of the Chair "Management and Modeling of Systems", Institute of Integrated Security and Special Instrumentation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Для цитирования: Лесько С.А., Алёшкин А.С., Филатов В.В. Стохастические и перколяционные модели динамики блокировки вычислительных сетей при распространении эпидемий эволюционирующих компьютерных вирусов // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 3. С. 7–27. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-7-27

For citation: Lesko S.A., Alyoshkin A.S., Filatov V.V. Stochastic and percolating models of blocking computer networks dynamics during distribution of epidemics of evolutionary computer viruses. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2019; 7(3):7-27. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-7-27

УДК 621.391.23

DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-28-40

Измерение параметров импульсных помех в пакетной радиолинии

А.Ю. Беккиев¹, В.А. Маковий²

¹АО «Российская электроника», Москва 121357, Россия ²АО «Концерн «Созвездие», Воронеж 394018, Россия [@]Автор для переписки, e-mail: sosmackayev@yandex.ru

Современные средства радиосвязи обеспечивают надежную передачу данных за счет адаптации радиолинии к реальной помеховой обстановке. Проведение корректных сравнительных испытаний различных радиостанций, предлагаемых производителями, и объективное сравнение полученных в полевых условиях результатов невозможно без инструментального контроля фактических параметров сигнала и помеховой обстановки в точке приёма. В работе рассматривается функционирование систем радиосвязи тактического звена управления при воздействии мощных импульсных помех различной природы. Предложен прибор, позволяющий производить оценку основных параметров импульсных помех, а именно эффективного значения огибающей смеси полезного сигнала, аддитивного шума, эффективного значения огибающей импульсных помех, скважности импульсных помех. Для обеспечения независимости измерений от конкретной реализации демодуляторов предложено использовать огибающую сигнала, принимаемого радиостанцией. Разработанный прибор в качестве измерительных сигналов использует штатные информационные пакеты радиолинии и не требует изменений в алгоритмах и временных диаграммах радиолинии или радиосети. Предложен метод измерения эффективного значения огибающей полезного сигнала и среднеквадратичного значения аддитивного шума при наличии импульсных помех в принимаемом сигнале. Доказано, что получение адекватных оценок мощности смеси полезного сигнала и шума возможно при отбрасывании значений выборки, подверженных воздействию импульсных помех. Предложено устройство, производящее сепарацию символов из принятых пакетов на символы, пораженные импульсными помехами и символы, не пораженные таковыми. Получены аналитические выражения, позволившие синтезировать алгоритмы функционирования прибора. Разработана структурная схема измерителя, приведены алгоритмы получения оценок измеряемых параметров.

Ключевые слова: тактическое звено управления, импульсные помехи, измерительный прибор, параметры импульсных помех.



Impulse Noise Parameter Assessment in a Batch Radio Channel

Azret Yu. Bekkiev¹, Vladimir A. Makoviy²

¹JSC "Ruselectronics", Moscow 121357, Russia ²JSC "Concern "Sozvezdie", Voronezh 394018, Russia [@]Corresponding author e-mail: sosmackayev@yandex.ru

Modern radio communication means to provide safe data transmission due to adapting radio channel to the actual noise environment. It is impossible to conduct proper comparative tests on various radio stations offered by manufacturers and to compare objectively the results obtained in field without actual signal parameters and noise environment instrument inspection at the reception point. The paper considers tactical level radio communications system operation when jammed with powerful impulse noise of various nature. It suggests a device enabling to assess the main parameters of impulse noise, namely desired signal and additive noise mixture envelope effective value, impulse noise envelope effective value, impulse noise duty factor. To provide measurement independence from a specific realization of a decoder it is suggested to use the envelope of a signal received by a radio station. The developed device uses standard radio channel data batches as measuring signals and does not require changing radio channel or radio network algorithms and timing charts. A method to assess the effective value of desired signal envelope and additive noise mean-square value when the received signal involves impulse noise is suggested. The paper demonstrates that valid assessment of desired signal and additive noise mixture is possible in case of setting aside selection values affected by impulse noise. A device separating symbols affected by impulse noise from those that are not affected is suggested. Formulas that allow synthesizing the device operation algorithms are obtained. The structure chart of the measurer is developed; the algorithms used to assess measured parameters are given.

Keywords: tactical control unit, impulse noise, measuring instrument, impulse noise parameters.

В настоящее время мир становится цифровым. Данное утверждение относится и к системам радиосвязи. Современные цифровые системы радиосвязи основаны на пакетной передаче информации. Важнейшими из систем радиосвязи являются системы радиосвязи тактического звена, которые основываются на пакетных радиоканалах с многокритериальной адаптацией под фактические условия распространения радиосигнала [1]. Обеспечение надежной и непрерывной радиосвязи в условиях информационного противоборства возможно при адаптации радиолиний и радиосетей к фактической электромагнитной обстановке. Повышение устойчивости и оперативности автоматического управления войсками обусловливает увеличение глубины адаптации и количества параметров радиолинии или радиосети, изменяемых в процессе адаптации [2]. Актуальность рассматриваемых вопросов определяется тем, что измерение основных параметров принимаемого сигнала необходимо для контроля фактической помеховой обстановки и затухания на трассе распространения радиосигнала. Проведение корректных сравнительных испытаний различных методов адаптации, предлагаемых производителями техники радиосвязи, и объективное сравнение полученных в полевых условиях результатов невозможно без инструментального контроля фактических параметров сигнала и помеховой обстановки в точке приёма.

Производители современных радиосредств декларируют высокую эффективность различных проприетарных технических решений. Учитывая, что в тактическом звене управления радиосвязь является основным видом связи [3], необходимо сопоставлять эффективность различных решений. Чтобы сравнение было объективным, следует осуществлять работу различных систем в равных условиях. Измерительный комплекс, позволяющий осуществлять инструментальный контроль параметров воздействующих помех, предложен в настоящей статье.

В качестве примера рассмотрим пакетную систему радиосвязи тактического звена управления на используемых в частях серийных радиостанций, принятых на снабжение Минобороны России [4]. В системах связи с коммутацией пакетов для осуществления доставки информации передаваемая информация разбивается на пакеты. Информацией может служить любая дискретная информация, например, сообщения, файлы, кодированная речь и т.д. Далее пакетная радиостанция осуществляет передачу пакетов, содержащих информацию, причем передача может происходить с использованием ретрансляции через другие радиостанции, принадлежащие системе связи, т.е. по одному или нескольким составным маршрутам, или напрямую между абонентами. Принимающая пакетная радиостанция преобразует принятые пакеты в абонентскую информацию с последующей передачей абоненту. В общем случае доставка информации между двумя абонентами может осуществляться по различным маршрутам. При отсутствии ретрансляции в сети из п пакетных радиостанций возможно существование $\frac{n \cdot (n-1)}{2}$ различных радиолиний.

Обеспечение надежности радиосвязи достигается адаптацией радиосети в целом или индивидуальной адаптацией каждой радиолинии. Попытка перебора всевозможных сочетаний различных воздействий на все радиолинии радиосети с целью верификации алгоритмов работы сети в ходе проведения трассовых испытаний практически неосуществима. Продолжительность испытаний для получения достоверной статистики, учитывающий всевозможные сочетания негативных факторов, значительно превышает интервал стационарности электромагнитной обстановки на местности.

Необходимость количественного сравнения эффективности различных алгоритмов адаптации потребовала создания прибора, измеряющего фактические параметры принимаемого сигнала в точке приема во время проведения испытаний. В отличие от известных, предлагаемый прибор в качестве измерительных сигналов использует штатные пакеты и не требует вмешательства в алгоритмы и временные диаграммы радиолинии или радиосети. Измерения ведутся в ходе штатной работы радиосети или радиолинии и основаны на использовании штатных сигнально-кодовых конструкций и помехоустойчивых кодов. Результаты измерений накапливаются для каждого корреспондента и для каждого типа пакета отдельно, на синхронизированных между собой интервалах измерений. В этом случае становится возможным апостериорная оценка эффективности работы различных алгоритмов.

В процессе трассовых испытаний системы пакетной радиосвязи в каждой точке приема производится измерение (оценивание) основных параметров принимаемых сигналов. На основании полученных оценок рассчитываются ожидаемые в этих условиях вероятностно-временные характеристики системы пакетной радиосвязи. Затем рассчитанные характеристики сравниваются с характеристиками, измеренными экспериментально, и делается вывод об адекватности работы алгоритмов адаптации пакетной радиостанции.

Рассмотрение работы проведём на примере серийной пакетной радиостанции¹. В ней применяются пакеты различной длительности, основные из них приведены в табл. 1.

Тип радиостанции	Длина кодового блока, бит	Количество символов, шт.	Длительность пакета для разных скоростей передачи, мс (миллисекунды)
1. Серийная УКВ	384	384 (192)	1.5320
2. Серийная УКВ	2640	2640 (1320)	102200

Таблица 1. Размер пакетов радиостанции тактического звена

Дальше примем длину пакета равной 384 символам (соответствует первой строке табл. 1). Для анализа пакетов другой длины можно воспользоваться представленным в статье математическим аппаратом. В общем случае при приеме информации фаза принимаемого сигнала является неизвестным параметром в точке приёма. Различные реализации приемных устройств пакетной радиостанции используют различные способы восстановления начальной фазы сигнала, а некоторые осуществляют некогерентный приём. Для обеспечения независимости измерений от конкретной реализации демодуляторов в предлагаемых алгоритмах получения оценок без потери общности будем использовать огибающую принимаемой смеси сигнала, аддитивного шума и импульсных помех (ИП).

Чтобы получить рассматриваемые параметры, найдём плотность огибающей смеси полезного сигнала, аддитивного гауссова шума и импульсной помехи. Далее под шумом будем понимать аддитивный гауссовый белый шум (АГБШ).

Уточним минимальное отношение сигнал/шум, при котором необходимо получить оценки мощности сигнала, шума и импульсной помехи, для чего оценим сверху помехоустойчивость приема сигналов с относительной фазовой телеграфией (ОФТ), используемой в радиостанции тактического звена. В соответствии с [5], помехоустойчивость на выходе демодулятора в канале с АГБШ определяется следующими выражениями:

для некогерентного приёма однократной ОФТ:

$$P1(x) = 0.5 \cdot e^{-x^2}, \tag{1}$$

для некогерентного приёма двукратной ОФТ:

$$P2(x) = \frac{\sqrt{1+\sqrt{2}}}{\sqrt{2}} \Phi(-x\sqrt{2-\sqrt{2}}), \qquad (2)$$

для когерентного приёма однократной и двукратной фазовой телеграфией (ФТ):

$$P3(x) = \Phi(-x\sqrt{2}) \tag{3}$$

где Ф – интеграл Лапласа;

¹Радиостанция Р-168-25У-2. Технические условия ИТНЯ 464511.245-05 ТУ.

$$\mathbf{x} = \frac{\mathbf{E}_{b}}{\mathbf{N}_{0}};$$

Е_ь – энергия на бит;

N₀ – спектральная плотность шума.

Графики помехоустойчивости, рассчитанные по формулам (1)–(3), приведены на рис. 1. В серийной радиостанции тактического звена реализован оптимальный некогерентный демодулятор, помехоустойчивость которого отличается от определяемой выражениями (1) и (2) менее, чем на 1.2 дБ. Использование аналитических выражений для потенциальной помехоустойчивости в дальнейших вычислениях не приводит к заметным погрешностям, но позволяет получить аналитическое решение задачи.



Рис. 1. Зависимость битовой ошибки (bit error rate – BER) от отношения энергии на бит к плотности шума (обозначения кривых см. в тексте).

На рис. 1 сплошной линией обозначена помехоустойчивость некогерентного приёма сигналов в АГБШ с однократной ОФТ, пунктирной линией – некогерентного приёма двукратной ОФТ, штриховой линией – когерентного приёма одно- и двукратной ФТ. По оси абсцисс отложено отношение энергии сигнала на бит к спектральной плотности шума $E_{\rm k}/N_0$ в дБ, по оси ординат – вероятность появления битовой ошибки (BER).

Эквивалентная шумовая полоса фильтра основной селекции радиостанций тактического звена равна скорости передачи. Максимальное значение BER на выходе демодулятора, при котором обеспечивается прием сигналов, не должно превышать 0.05. Тогда в соответствии с графиками на рис. 1 отношение среднеквадратичного напряжения сигнала к среднеквадратичному значению шума на входе должно быть не менее 3.6 дБ для некогерентного приёма однократной ОФТ, не менее дБ для некогерентного приёма двукратной ОФТ, не менее 1.3 дБ – для когерентного приёма одно- и двукратной ФТ.

В аппаратуре тактического звена применено помехозащищенное кодирование, обладающее следующими свойствами: значение BER = 0.05 на входе декодера соответствует вероятности правильного декодирования пакета 0.95, то есть вероятность пакета с ошибкой на выходе декодера (frame error rate – FER) составит не более 0.05. Критерием адаптации вниз по скорости является вероятность правильного декодирования пакета менее 0.5. При этом отношение сигнал/шум на входе демодулятора уменьшается на 1.5 дБ относительно значения, при котором BER = 0.05. Этот же критерий действует для адаптации по скорости вверх.

Шаг адаптации по скорости и полосе принят равным 2. В соответствии с (1) и (2) для отличающихся в два раза скоростей при одном и том же значении BER помехоустойчивость отличается на 3 дБ. Поэтому адаптация вверх по скорости должна происходить при увеличении отношения сигнал/шум на 1.5 дБ относительно BER = 0.05.

Для используемых в аппаратуре тактического звена сигналов символы пакета имеют одинаковую энергию. Амплитудное значение символа рассматриваемых видов модуляции отличается от среднеквадратичного значения на 3 дБ. Таким образом, для некогерентного приемника двукратной ОФТ с адаптацией по скорости и полосе получим минимальное отношение амплитуды сигнала к эффективному значению шума:

$$SNR2 = SNR1 + Ka - \frac{\Delta SNR}{2} = 8.38 \, \text{д}\text{B}$$

и максимальное отношение амплитуды сигнала к эффективному значению шума:

$$SNR3 = SNR1 + Ka + \frac{\Delta SNR}{2} = 11.38 \, \text{д}\text{E}.$$

Алгоритм адаптации путем изменения скорости передачи обеспечивает нахождение величины отношения амплитуды сигнала к эффективному значению шума между SNR2 и SNR3 для всех номиналов скоростей, кроме самой высокой скорости передачи. Дальнейший анализ будем проводить для минимальных значений отношения амплитуды сигнала к эффективному значению шума A₁/σ_ш = 8.38 дБ.

Определим величину смещения оценки мощности полезного сигнала и шума за счет присутствия в принимаемом сигнале импульсных помех (ИП). Определим, что средним количеством ИП на один пакет χ является количество символов, поражённых ИП, делённое на число символов в пакете. В силу независимости ИП и смеси сигнала и шума смещение оценки λ_1 , получаемое по известному алгоритму:

$$P_{c} + P_{m} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_{i}^{2}$$
(4)

составит:

$$\lambda_{1} = 10 \cdot \log\left(\frac{\left(A_{1}^{2}+1\right) \cdot (1-\chi) + \left(A_{\mu \pi}^{2}+A_{1}^{2}+1\right) \cdot \chi}{A_{1}^{2}+1}\right),$$
(5)

где $\boldsymbol{A}_{1}-$ амплитуда полезного сигнала;

А_{ип} – амплитуда импульсной помехи.

Рассчитанное в соответствии с (5) смещение оценки мощности смеси полезного сигнала и шума приведено на рис. 2. Графики на рис. 2 представлены для трёх значений отношения эффективного напряжения ИП $A_{\rm NII}$ к эффективному напряжению полезного сигнала A_1 сплошной: линией показано отношение $A_{\rm NII}/A_1 = 11.6$ дБ, пунктирной – $A_{\rm NII}/A_1 = 15.1$ дБ, штриховой – $A_{\rm NII}/A_1 = 21.1$ дБ. Из представленных графиков видно, что уже при поражении ИП 5% символов $\chi = 0.05$ смещение оценки может достигать 8 дБ.



Рис. 2. Смещение оценки суммы мощностей полезного сигнала и шума при среднем количестве ИП χ , в принимаемом пакете информации.

На рис. 3 представлено смещение оценки, получаемой при вычислении мощности смеси полезного сигнала и шума по формуле (5), в зависимости от мощности действующей ИП, при χ = 0.1 – сплошная линия и χ = 0.2 – пунктирная линия.



Рис. 3. Смещение оценки эффективного значения огибающей смеси сигнала и шума при различной мощности ИП и заданном значении скважности ИП χ .

Как видно из представленных рис. 2 и 3 графиков, смещение оценок мощности смеси полезного сигнала и шума достигает более 3 дБ при $A_{\mu\Pi}/A_1 > 6...8$ дБ. Такие оценки неприемлемы для практического использования.

С целью уменьшения влияния ИП на смещение оценки эффективного значения огибающей смеси полезного сигнала и шума предлагается проведение сепарации (разделения) принимаемых символов в пакете на символы, пораженные ИП и не пораженные ИП. Для этого требуется знание плотности огибающей суммы ИП, сигнала и шума. Данная плотность получена в [6]:

$$W1_{i} = \frac{1}{N_{4}} \sum_{i=0}^{N_{4}-1} \frac{2 \cdot R \cdot i}{N_{2} \cdot \sigma^{2}} \cdot e^{\frac{\left(\frac{2 \cdot R \cdot i}{N_{2}}\right)^{2} + A_{0i}i^{2}}{\sigma^{2}}} \cdot I_{0} \left(\frac{A_{0i1} \cdot \frac{2 \cdot R \cdot i}{N_{2}}}{\sigma^{2}}\right),$$
(6)

где A_{0i1} – i1-й отсчет амплитуды на входе приёмника (6);

N₂ – количество отсчетов при дискретном представлении искомой плотности;

- $\mathrm{N_4}-$ количество отсчетов в дискретном представлении плотности суммы 2-х векторов;
- σ среднеквадратическое значение гауссова шума на входе приемника;
- R размах области дискретного представления полученной плотности [7];
- I₀ функция Бесселя первого вида нулевого порядка.

Используя представленную плотность, в [6] был синтезирован сепаратор, получены вероятностные характеристики его работы, а именно вероятность ложной тревоги и вероятность пропуска ИП.

Для сепарации необходим обнаружитель ИП, например, работающий по критерию Неймана-Пирса. Построение подобных устройств описано в [8]. Получение совместных оценок мощности полезного сигнала и шума, также известно и рассматривается в работе [9]. На основе приведённых в [6, 8, 9] структурных схем и алгоритмов разработано устройство, производящее сепарацию символов на символы, пораженные ИП и символы, не пораженные ИП. Это устройство обеспечивает получение оценок мощности смеси полезного сигнала и шума, мощности ИП, скважности ИП и совместных оценок мощности полезного сигнала и шума. Его структурная схема приведена на рис. 4.

Прибор на рис. 4 работает следующим образом. На вход прибора поступает смесь полезного сигнала, гауссова шума и ИП, обозначенная s(t). Далее в ВО производится вычисление эффективного значения огибающей входного сигнала для каждого символа.



Рис. 4. Структурная схема прибора для измерения параметров принимаемого сигнала в пакетной радиолинии:

ВО – вычислитель огибающей; VAR – устройство взятия порядковой статистики; X – умножающее устройство; СС – схема сравнения, формирует сигнал с уровнем 1 при превышении сигнала первого входа по сравнению со вторым входом; Кл – управляемый ключ;

- X^2 устройство возведения в квадрат; Σ накапливающее устройство, вычисляет величину $\sum x_i$;
- X^{0.5} устройство извлечения квадратного корня; X^{0.25} устройство извлечения корня четвертой степени; x/y – устройство вычисления отношения x к y; K₀ – константа; "-" – вычитающее устройство.

Вычисление производится по формуле:

$$A(t) = \sqrt{\left(s(t) \otimes h_s(t)\right)^2 + \left(s(t) \otimes h_c(t)\right)^2}$$
(8)

где s(t) – входной сигнал;

h_s(t) – импульсная характеристика полосового фильтра, интервал корреляции импульсной характеристики соответствует длине символа;

 $h_{c}(t)$ – преобразование Гильберта от $h_{s}(t)$;

⊗ – операция свертки.

После получения эффективного значения огибающей всех символов принимаемого пакета они сохраняются в памяти, и из них затем формируется вариационный ряд. Заранее определённый член вариационного ряда поступает на умножители, которые формируют пороги умножением на постоянные коэффициенты. Коэффициенты выбираются, исходя из требуемого значения вероятности ложной тревоги. Для первой схемы формирования порога, с помощью которой производится получение оценок мощности ИП, мощности смеси полезного сигнала и шума, этот член вариационного ряда умножается на коэффициент, соответствующий вероятности ложной тревоги 6·10⁻². Значение ложной тревоги 6·10⁻² выбирается примерно равным значению χ , при котором смещение оценки A_1 будет допустимым. Выше на рис. 2 было показано, что при отношении $A_{\rm ип}/A_1 = 11.6$ дБ будут хорошо обнаруживаться в сепараторе [6], выбор вероятности ложной тревоги, равной 0.06, не будет приводить к существенным смещениям оценки.

Для второй схемы формирования порога, с помощью которой производится оценка скважности ошибок χ , эффективного значения огибающей ИП коэффициент, выбирается исходя из смещения значений получаемых оценок. Диапазон оцениваемой величины χ составляет 0.005 до 0.2. Нижний предел обусловлен слабым влиянием количества пораженных ИП символов (менее 0.5%) на помехоустойчивость приема, поскольку протокол передачи рассчитан на работу в условиях BER = 0.05. Если предположить, что ИП достаточно мощные и при их появлении каждый бит информации пораженный ИП искажается с вероятностью 0.5, то при числе ИП менее 0.5% вероятность ошибок за счет вклада ИП составит не более 0.25% или 0.0025. Верхний предел ИП обусловлен невозможностью приема при возникновении BER > 0.1 за счет вклада ИП. Если задаться наименьшим числом ИП 0.5% ($\chi = 0.005$), то вероятность ложной тревоги, соответствующая значению 10⁻⁵, не будет оказывать существенного влияния на оценку χ , так как количество ложных срабатываний схемы сравнения приходящихся на количество правильных срабатываний будет невелико.

Далее на один вход схемы сравнения (СС) поступают эффективные значения огибающей всех символов пакета, а на второй вход – сформированные пороговые значения. При превышении порога схема сравнения вырабатывает сигнал логической единицы, при непревышении порога – сигнал логического нуля. Со второй схемы сравнения сигналы поступают на суммирующее устройство, которое вычисляет количество срабатываний СС. Накопление производится на количестве символов, достаточном для получения статистических характеристик оценок, результат делится на количество обрабатываемых СС
символов. Так формируется оценка параметра скважности ИП χ . С первой схемы сравнения сигнал поступает на логический инвертор и далее на ключевое устройство, которое открывается при наличии на его входе управления логической единицы. На второй вход ключа с выхода вычислителя огибающей ВО поступают эффективные значения огибающей всех символов пакета. Таким образом, на выходе ключевого устройства будут присутствовать только те значения эффективного значения огибающей, которые превысили порог, то есть в которых схема сравнения не обнаружила наличия ИП. Далее эти значения возводятся в квадрат и накапливаются на длине одного пакета. Так получаем суммарную мощность символов, которые не превысили первый порог. Одновременно производится накопление количества срабатываний схемы сравнения СС. Затем в устройстве взятия отношения полученная суммарная мощность делится на число срабатываний СС. На выходе устройства взятия отношений получаем оценку смеси мощности полезного сигнала и шума.

С выхода схемы сравнения логический сигнал поступает на ключевое устройство, которое открывается, если на выходе схемы сравнения будет логическая единица, и также на накапливающее устройство Σ , которое вычисляет количество превышений порога (обнаруженных ИП). С выхода ключевого устройства сигнал возводится в квадрат. В результате получаем мощность смеси полезного сигнала, шума и ИП по символам пакета, в которых обнаружены ИП. С выхода устройства возведения в квадрат результат поступает на накапливающее устройство, с выхода которого поступает на устройство вычисления отношения x/y. На выходе устройства вычисления отношения получаем среднее значение мощности смеси полезного сигнала, шума и ИП. Предполагая, что на длине одного пакета мощность сигнала и шума существенно не меняется, для получения мощности ИП производим вычитание в вычитающем устройстве из оценки мощности смеси полезного сигнала, шума и ИП ранее полученную оценку мощности смеси сигнала и шума. В результате получаем оценку мощности ИП. Для получения эффективного значения огибающей ИП извлекаем из полученной средней мощности корень в устройстве $X^{0.5}$.

При малом количестве ИП представленный алгоритм получения оценки среднеквадратичного значения ИП может формировать недостоверную статистику. Поэтому число обнаруженных ИП сравнивается в схеме сравнения с константой K₀. Константа K₀ выбирается исходя из условия получения достоверных оценок, обычно более 10. При числе обнаруженных ИП больше K₀ схемой сравнения СС формируется сигнал на открытие ключа с выдачей полученной статистики эффективного значения огибающей ИП потребителю.

Задача получения совместных оценок эффективного значения огибающей полезного сигнала и среднеквадратического значения шума является двухпараметрической задачей получения оценок параметров случайных величин. Для ее решения воспользуемся методом моментов, изложенным в [9]. В рассматриваемом случае отличие состоит в получении оценок эффективного значения огибающей полезного сигнала и среднеквадратического значения процедуры предварительной сепарации символов принимаемого пакета на символы, пораженные ИП и не пораженные ИП. Получение совместных оценок эффективного значения огибающей полезного сигнала А₁ и среднеквадратичного значения шума σ_ш основано на следующих известных формулах [9]:

$$Ac = \sqrt[4]{2 \cdot \left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} x_i^2\right)^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i^4}$$
(9)

$$\sigma_{\rm m} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i^2 - \sqrt{2 \cdot \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i^2 \right)^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i^4 \right]}$$
(10)

где x_i – эффективное значение огибающей символов.

Алгоритм обработки реализуется в соответствии с (9) и (10). Значения мощности смеси полезного сигнала и шума, не превысившие порог (т. е. тех случаев, в которых не было обнаружения ИП), для получения оценки мощности полезного сигнала значения мощности возводятся в квадрат и накапливаются в суммирующем устройстве. Получаем среднее значение квадрата мощности как результат деления сигнала на выходе суммирующего устройства на число символов, амплитуда которых была меньше порога. Одновременно усредненное значение мощности смеси полезного сигнала, полученное ранее, возводится в квадрат и умножается на постоянный коэффициент, равный двум (9). Далее значения мощности сигнала, не превысившие порог, возводятся в устройстве возведения в квадрат и накапливаются в накапливающем устройстве Σ. С выхода накапливающего устройства результат поступает на устройство вычисления отношения х/у. В результате получаем усредненное значение квадрата мощности случайных величин, не превысивших порог. В вычитающем устройстве производится вычитание полученного ранее значения удвоенного квадрата усредненной мощности из усреднённого значения квадрата мощности. Из полученного значения извлекается корень четвертой степени в устройстве вычисления корня четвертой степени $X^{0.25}$ (9). В результате получаем оценку эффективного значения огибающей полезного сигнала. Для получения оценки среднеквадратичного значения составляющей шума из полученного ранее значения на выходе вычитающего устройства извлекается квадратный корень. Далее полученное значение вычитается из значения оценки мощности полезного сигнала. Результат вычитания в устройстве умножения умножаем на постоянный коэффициент 0.5 (10), после чего из результата извлекается квадратный корень (10). Далее оценка корректируется умножением на постоянный коэффициент 1.216. Данный коэффициент определяется на этапе реализации прибора исходя из величины постоянного смещения оценки. Таким образом, получается оценка среднеквадратического значения аддитивной составляющей шума.

Детально работа и полученные характеристики составной части радиостанции тактического звена в части вероятности ложной тревоги и вероятности пропуска ИП рассмотрены в [6]. В частности, показано, что при отношении ИП к полезному сигналу более, чем на 9 дБ, производится надежная сепарация символов на символы, пораженные ИП и символы не пораженные ИП. Также, учитывая, что смещение оценок при наличии в выборке символов пораженных ИП с отношением $A_{\rm ИП}/A_1 < 6...8$ дБ оказывает незначительное смещение на оценку мощности смеси полезного сигнала и аддитивного шума можно сделать вывод, что использование рассмотренного сепаратора позволит получить близкие к необходимой точности оценки.

В ходе дальнейших исследований предполагается получить количественные характеристики качества работы устройства (смещение и доверительный интервал), изображенного на рис. 4, для следующих оценок:

- эффективного значения огибающей полезного сигнала;

- эффективного значения огибающей импульсных помех (ИП);
- скважности ИП;
- эффективного значения огибающей смеси сигнала и шума;
- среднеквадратичного значения аддитивного шума.

Представленный на рис. 4 прибор предполагается для интеграции в SDR радиостанции типа P168, для получения оценок ИП в ходе эксплуатации аппаратуры P168, которая будет использована в дальнейшем для верификации работы систем адаптации пакетной радиолинии.

Выводы

Для обеспечения корректности и объективного сравнения результатов испытаний различных методов адаптации предложен принцип построения прибора для измерения комплекса параметров импульсных помех, полезного сигнала и шума. Доказано, что получение адекватных оценок мощности смеси полезного сигнала и шума без отбрасывания значений выборки, подверженных воздействию ИП, невозможно. Получены аналитические выражения, позволяющие синтезировать алгоритмы функционирования прибора. Разработана структурная схема прибора. Предложены направления дальнейших исследований для уточнения точностных характеристик.

Литература:

1. Маковий В.А., Голубинский А.Н. Реализованные и потенциально возможные скорости передачи в автоматизированных системах управления и связи // Теория и техника радиосвязи. 2018. № 2. С. 97–109.

2. Маковий В.А. Построение современных систем радиосвязи КВ-диапазона // Теория и техника радиосвязи. 2009. № 3. С. 76–86.

3. Макаренко С.И., Сапожников В.И., Захаренко Г.И., Федосеев В.Е. Системы связи / Под общ. ред. С.И. Макаренко. Воронеж: Изд. ВАИУ, 2011. 285 с.

4. Proakis J.G., Salehi M. Digital Communications. 5th Ed. McGraw-Hill Science, 2007. 1150 p.

5. Чупеев С.А. Обнаружение импульсных помех в радиолиниях // Теория и техника радиосвязи. 2018. № 4. С. 23–35.

6. Чупеев С.А. Метод расчета вероятностных характеристик на основе дискретного представления плотности вероятности // Радиотехника. 2016. № 5. С. 112–119.

7. Бокк О.Ф., Грибко В.М. Анализ работы блока защиты при воздействии на его вход белого шума // Техника средств связи, сер. ТРС. 1985. Вып. 7. С. 114–121.

8. Яковлева Т.В. Математические методы анализа данных в условиях применимости статистической модели Райса: дис. ... д-ра физ.-мат. М.: ФГБУН ВЦ РАН, 2014. 260 с.

References:

1. Makoviy V.A., Golubinskiy A.N. Realized and potentially-enable transfer rate in automated control and communication systems. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi* (Radio Communication Theory and Technology). 2018; (2):97-109. (in Russ.)

2. Makoviy V.A. Construction of modern system of radio communication of SW band.

Teoriya i tekhnika radiosvyazi (Radio Communication Theory and Technology). 2009; (3):76-86. (in Russ.)

3. Makarenko S.I., Sapozhnikov V.I., Zakharenko G.I., Fedoseev V.E. Communication systems. Ed. by S.I. Makarenko. Voronezh: VAIU Publ. (Voronezh Military Aviation Engineering University Publ.), 2011. 285 p. (in Russ.)

4. Proakis J.G., Salehi M. Digital Communications. 5th Ed. McGraw-Hill Science, 2007. 1150 p.

5. Chupeev S.A. Impulse noise detection in radio lines. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi* (Radio Communication Theory and Technology). 2018; (4):23-35. (in Russ.)

6. Chupeev S.A. Method of calculation of probabilistic characteristics based on discrete representation of frequency distribution. *Radiotekhnika* (Radio Technics). 2016; (5):112-119. (in Russ.)

7. Bokk O.F., Gribko V.M. Analysis of security block operation under the influence of blank noise on its input. *Tekhnika sredstv svyazi, seriya TRS* (Communications equipment, series TRS). Moscow. 1985; (7):114-121. (in Russ.)

8. Yakovleva T.V. Mathematical methods of data analysis under conditions of applicability of statistical model of Rice: D.Sc. (Phys. and Math.) Thesis. FSBI Computation Centre of Russian Academy of Sciences, 2014. 260 p. (in Russ.)

Об авторах:

Беккиев Азрет Юсупович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, член-корреспондент РАРАН, заместитель генерального директора АО «Российская электроника» (121357, Россия, г. Москва, Верейская ул., д. 29, стр. 141).

Маковий Владимир Александрович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, директор научно-технического центра АО «Концерн "Созвездие"» (394018, Россия, г. Воронеж, ул. Плехановская, д. 14).

About the authors:

Azret Yu. Bekkiev, D.Sc. (Engineering), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of Russian Academy of Missile and Ammunition Sciences, Deputy General Director of JSC "Ruselectronics" (29 build., 141, Vereyskaya st., Moscow 121357, Russia).

Vladimir A. Makoviy, D.Sc. (Engineering), Senior Researcher, Head of the Technical-Research Centre of JSC "Concern "Sozvezdie" (14, Plekhanovskaya st., Voronezh 394018, Russia).

Для цитирования: Беккиев А.Ю., Маковий В.А. Измерение параметров импульсных помех в пакетной радиолинии // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 3. С. 28–40. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-28-40

For citation: Bekkiev A.Yu., Makoviy V.A. Impulse noise parameter assessment in a batch radio channel. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2019; 7(3):28-40. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-28-40

УДК 621.592

DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-41-49

Радиационная стойкость эпитаксиальных структур на основе GaAs

Е.Н. Вигдорович

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия [@]Автор для переписки, e-mail: evgvig@mail.ru

В настоящей работе представлены результаты исследования облучения гетероструктур на основе арсенида галлия нейтронами и гамма-квантами. В качестве источника нейтронов служил горизонтальный канал реактора ИРТ-2000 с энергией 2.65 МэВ. Рассматривали два типа структур: автоэпитаксиальные (АЭС) и гетероэпитаксиальные (ГЭС), полученные МОС-гидридным методом при пониженном давлении с использованием металлорганических соединений галлия и алюминия и арсина. Полученные результаты показали, что при облучении нейтронами и гамма-квантами концентрация носителей заряда автоэпитаксиальных структур и плотность носителей заряда гетероэпитаксиальных структур изменяется незначительно. Что касается подвижности носителей заряда, то в начальный момент при облучении наблюдается некоторое увеличение подвижности носителей заряда. Далее по мере увеличения плотности потока облучения подвижность или стабилизируется на определенном уровне, или уменьшается. Факт увеличения подвижности после первого облучения гетероструктур свидетельствует об увеличении времени жизни носителей заряда, по-видимому, вследствие уменьшения в структурах концентрации центров рекомбинации, вероятнее всего, плотности структурных дефектов на гетрограницах. При облучении быстрыми нейтронами наблюдается аналогичная картина: первоначально подвижность носителей заряда несколько увеличивается при небольшом изменении концентрации носителей заряда, затем характеристики стабилизируются. Наблюдается повышение однородности свойств по площади структур. Высказано предположение, что это связано с возникновением кластеров дефектов и примесей.

Ключевые слова: арсенид галлия, облучение, автоэпитаксиальные структуры, гетероэпитаксиальные структуры, концентрация и подвижность носителей заряда.

Radiation Resistance of Epitaxial Structures Based on GaAs

E.N. Vigdorovich

MIREA – *Russian Technological University, Moscow 119454, Russia* [@]*Corresponding author e-mail: evgvig@mail.ru*

This paper presents the results of a study on the irradiation of heterostructures based on gallium arsenide with neutrons and gamma rays. The horizontal channel of the IRT-2000 reactor with an energy of 2.65 MeV served as a source of neutrons. Two types of structures were considered: autoepitaxial (AES) and heteroepitaxial (HES). They were obtained by the MOC-hydride method under reduced pressure using gallium and aluminum organometallic compounds and arsine. The obtained results show that irradiation with neutrons and gamma-quanta just slightly changes the concentration of the charge carriers of the autoepitaxial structures and the density of the charge carriers of the heteroepitaxial structures. As for the mobility of charge carriers, some increase in their mobility is observed at the initial moment of irradiation. As the irradiation flux density increases, the mobility either stabilizes at a certain level or decreases. The increase in mobility after the first irradiation of the heterostructures indicates an increase in the lifetime of charge carriers, apparently due to a decrease in the concentration of recombination centers in the structures, most likely, the density of structural defects at the heteroboundaries. When irradiating with fast neutrons, a similar picture is observed. Initially, the mobility of charge carriers slightly increases as the concentration of charge carriers slightly changes. Then the characteristics stabilize. An increase in the uniformity of properties over the area of the structures is observed. It is assumed that this is due to the appearance of clusters of defects and impurities.

Keywords: gallium arsenide, irradiation, autoepitaxial structures, heteroepitaxial structures, charge carrier concentration and mobility.

Введение

Одним из наиболее перспективных материалов электроники является арсенид галлия (GaAs) [1–3], который во многих случаях приходит на смену кремния. Разработка и освоение арсенид-галлиевых приборов и схем специального назначения позволяет повысить эффективность и обеспечить улучшение их характеристик. Появляется возможность повысить частотные характеристики приборов и устойчивость к внешнему воздействию: температура, излучение, электрические поля. Под воздействием проникающей радиации возможны значительные изменения свойств материалов активных и пассивных элементов, а также функциональных характеристик приборов и устройств. Поэтому для разработчиков чрезвычайно важно иметь информацию о процессах, протекающих в материалах, структурах, приборах и устройствах, при воздействии на них приникающего радиационного излучения [4, 5].

Радиационные процессы в GaAs

Упругое рассеяние на ядрах, приводящее их к смещению из узлов кристаллической решетки, является основным процессом взаимодействия *нейтронов* с твердыми телами. Этот процесс отражает основную особенность: линейную зависимость пороговой энергии образования электронно-дырочных пар от ширины запрещенной зоны. Для элементарных полупроводников и соединений $A^{III}B^{V}$ расчет дает следующие значения, эВ: Ge – 2.8; Si – 3.6; GaAs – 4.8; GaP – 7.8; GaN – 10.1. В общем случае *при необратимых процессах* во время облучения высокоэнергетическими частицами полупроводников происходит изменения концентрации (*N*), подвижности (µ) и времени жизни (τ) свободных носителей заряда:

$$N = N_0 (1 - K_N \Phi);$$

$$\frac{1}{\mu} = (\frac{1}{\mu_0})(1 + K_\mu \Phi);$$

$$\frac{1}{\tau} = (\frac{1}{\tau_0})(1 + K_\tau \Phi)$$

где Ф – флюенс (доза радиации),

К_i – коэффициент деградации.

С учетом эффективности введения радиационных дефектов $(\frac{dN}{d\Phi})$ можно написать:

$$K_i = \frac{dN}{d\Phi} \sigma v$$

где v – тепловая скорость носителей;

σ – сечение захвата неосновных носителей.

Значение константы K_i в основном *определяется энергией смещения атома* из узла кристаллической решетки. В рассматриваемом случае основной вклад дают связанные друг с другом энергия атомизации и ширина запрещенной зоны. Согласно расчету, энергия атомизации составляет, эВ: Ge – 11; Si – 13; GaAs –10; GaP –17; GaN – 28. По этому параметру радиационная устойчивость арсенида галлия несколько хуже кремния, но для твердых растворов, например, Ga_{1-x}Al_xAs, Ga_{1-x}In_xAs и Ga_{1-x}Al_xN, Ga_{1-x}In_xN, минимальная энергия смещения атома будет больше за счет увеличения вклада энергии искажения кристаллической решетки, и, соответственно, выше их радиационная стойкость.

Экспериментальное исследование радиационной устойчивости эпитаксиальных структур на основе арсенида галлия

Исследованы два типа структур – автоэпитаксиальные (АЭС) и гетероэпитаксиальные (ГЭС), полученные МОС-гидридным методом при пониженном давлении с использованием металлоорганических соединений галлия и алюминия и арсина [6]. Основные исходные характеристики изучаемых структур приведены в табл. 1 и 2. В качестве источника нейтронов использовали горизонтальный канал реактора ИРТ-2000 с энергией 2.65 МэВ. Концентрацию носителей заряда определяли емкостным методом, а подвижность носителей заряда – методом Ван дер Пау. Подвижность носителей заряда двумерного электронного газа ($\mu_{дэт}$) контролировали при температуре 300 К. Плотность носителей заряда двумерного электронного газа (N_{nar}) определяли расчетным путем по формуле:

$$N_{\rm IIDE} = 1.38 \times 10^{18} \times I / (\mu \times U_{\rm cp}),$$

где: µ – подвижность носителей заряда при 300 K, см² / В×с;

 U_{cp} – величина среднего падения напряжения на образце (В), измеряемая при токе IA, одновременно с измерением подвижности носителей заряда.

Концентрацию носителей заряда в GaAs(n)-слое (N_n) определяли из графика профиля легирования, измеренного в центральной области структуры при напряжении смещения 0.2 В на измерительном контакте.

Наименование параметра	Спецификация (метод контроля)
1.Общие характеристики:	
– метод получения	МОС-гидридный
 – легирующий элемент (для получения легированных слоев) 	Кремний
2. Электрические характеристики	
2.1 <i>п</i> – активный слой:	
– концентрация носителей заряда, см ⁻³ ;	$3 \times 10^{17} \pm 30\%$
– подвижность носителей заряда, см ² /В·с;	>3300
2.2 <i>п</i> ⁻ _о – буферный слой:	
– концентрация носителей заряда, см ⁻³	$< 1 \times 10^{14}$
2.3. Подложка монокристаллического арсенида галлия:	
– удельное сопротивление, Ом см	>1×107
– тип проводимости;	n
– подвижность носителей заряда, см ² /В·с	>5000

Таблица 1. Спецификация на автоэпитаксиальные структуры арсенида галлия типа $n - n_{\delta}^{-} - i$

Таблица 2. Спецификация на гетероэпитаксиальные структуры на основе арсенида галлия типа $GaAs(n_{\kappa}^{+}) - GaAlAs(n^{+}) - GaAlAs(n^{-}) - InGaAs(n^{-}) - GaAs(n_{\delta}) - GaAs(подложка)$

Наименование параметра	Спецификация (метод контроля)
1. Общие характеристики:	
– метод получения	МОС-гидридный
– легирующий элемент	Кремний
2. Электрические характеристики	
2.1 Структура в целом:	
 плотность носителей заряда двумерного электронного газа, см⁻² 	не менее 1.5×10 ¹²
 подвижность носителей заряда двумерного электронного газа при 77К, см²/В·с 	не менее 1×10^4
$2.2 \text{ GaAs}(n_{\kappa}^{+})$ – контактный слой:	
– концентрация носителей заряда, см ⁻³	$1 \times 10^{18} \pm 20\%$
2.3 GaAlAs(<i>n</i> ⁺)-слой:	
– концентрация носителей заряда, см ⁻³	$(1-2) \times 10^{18}$
2.4 GaAs (n_{6}^{-}) – буферный слой:	
– концентрация носителей заряда, см ⁻³	$< 1 \times 10^{14}$
2.5 Подложка монокристаллического GaAs:	
– удельное сопротивление, Ом.см	>1×107
– тип проводимости	n
– подвижность носителей заряда, см ² /В·с	>5000
3. Толщина слоя	
3.1 GaAs (n_{κ}^{+}) , мкм	$0.01{\pm}15\%$
3.2 GaAlAs (n^{+}) , мкм	0.04–0.08
3.3 GaAlAs(n ⁻), Å	30–50
3.4 InGaAs(<i>n</i> ⁻), Å	90–120
3.5 GaAs (n_{6}^{-}) , Å	0.5–0.8
3.6 Подложка монокристаллического GaAs	
– диаметр, мм	50±0.5

Наименование параметра	Спецификация (метод контроля)
– толщина пластины, мкм	500±20
– ориентация поверхности	$(100) \ 3^{\circ} \rightarrow (0\overline{1}\overline{1})$
4. Химические характеристики	
4.1 GaAlAs – содержание алюминия, % ат.	27–33
4.2 InGaAs(<i>n</i> [°]) – содержание индия, % ат.	16–20

Таблица 2. Окончание

Результаты измерения обрабатывали по формулам дисперсионного анализа в доверительном интервале 95% с использованием распределения Стьюдента (*n*<30). Обрабатывали по 3 партии образцов при количестве эпитаксиальных структур в партии 5 шт.

Результаты и их обсуждение

Полученные в ходе исследования данные представлены на рис. 1-4.



Рис. 1. Изменение подвижности носителей заряда в автоэпитаксиальных структурах при нейтронной обработке: 1, 2, 3 – номер партии.



Рис. 2. Изменение подвижности носителей заряда в гетероэпитаксиальных структурах при нейтронной обработке: 1, 2, 3 – номер партии.



Рис. 3. Изменение подвижности носителей заряда в автоэпитаксиальных структурах при воздействии гамма-излучения:1, 2, 3 – номер партии.



Рис. 4. Изменение подвижности носителей заряда в гетероэпитаксиальных структурах при воздействии гамма-излучения: 1, 2, 3 – номер партии.

Результаты показывают, что при облучении нейтронами и гамма-квантами концентрация носителей заряда автоэпитаксиальных структур и плотность носителей заряда гетероэпитаксиальных структур изменяется незначительно. Этого нельзя сказать о подвижности носителей заряда: при облучении в начальный момент времени наблюдается некоторое увеличение подвижности носителей заряда. В дальнейшем при увеличении плотности потока облучения подвижность или стабилизируется на определенном уровне, или уменьшается. В некоторых случаях при дальнейшем увеличении плотности потока вновь наблюдается повышение подвижности носителей заряда. Очевидно, эпитаксиальные структуры после выращивания не находятся в состоянии термодинамического равновесия. При воздействии облучения метастабильные состояния примесей и дефектов в эпитаксиальных слоях переходят в новое, по сравнению с исходным, более устойчивое термодинамическое состояние [7– 9]. В результате облучения за счет генерации электронно-дырочных пар возникают диффузионные фототоки. Возникшие вследствие генерации электроны и дырки, являясь подвижными носителями, при перемещении в материале будут рассеиваться и рекомбинировать. В случае достаточно высокой инжекции носителей заряда изменение концентрации носителей пропорционально скорости генерации носителей заряда.

В наших исследованиях после первого облучения гамма-лучами плотность концентрации носителей заряда для гетероструктур уменьшилась незначительно – с 2.2·10¹² до $1.5 \cdot 10^{12}$ см⁻², а подвижность увеличилась с 5900 до 6800 см²/В·с. Последующие операции облучения не привели к изменению электрофизических характеристик. Снижение плотности концентрации носителей заряда после первого облучения может свидетельствовать о том, что скорость генерации носителей меньше скорости рекомбинации. Это происходит в том случае, если в исходных структурах имеется большое количество центров рекомбинации. Вероятнее всего, это структурные дефекты на гетерограницах структуры. Наблюдаемое при облучении автоэпитаксиальных структур незначительное уменьшение концентрации носителей заряда и увеличение их подвижности указывает на то, что, кроме рекомбинации носителей заряда в объеме (объемная рекомбинация) материала, для обоих типов структур не исключена рекомбинация на оборванных связях поверхности (поверхностная рекомбинация) [10–12]. Установлено, что после первого облучения электропроводность если и уменьшилась, то незначительно. Скорее всего, это связано только с уменьшением в структурах концентрации центров рекомбинации, то есть плотности структурных дефектов на гетерограницах. Указанное явление позволяет утверждать, что в процессе первой обработки гетероструктур происходит некоторое «залечивание» неравновесной системы, состоящей из слоев с различными свойствами. Необходимо отметить, что при облучении автоэпитаксиальных структур данное явление проявляется в значительно меньшей степени, что и подтверждает нашу гипотезу.

При облучении быстрыми нейтронами наблюдается аналогичная картина. Сначала несколько увеличивается подвижность носителей заряда с одновременным небольшим изменением концентрации носителей заряда, затем характеристики стабилизируются. Состояние материала сдвигается в сторону термодинамического равновесия. Наблюдается повышение однородности свойств по площади структур. Вероятнее всего, это связано с возникновением кластеров дефектов и примесей.

Заключение

Приведенные в работе результаты относятся к простейшим структурам (без *p-n*-переходов, барьеров Шоттки, подзатворных каналов, квантовых ям, сверхрешеток и пр.). При усложнении типа эпитаксиальных структур необходимо проводить для каждого типа специальные исследования. Следует заметить также, что данные исследования не позволили определить критические значения устойчивости изучаемых эпитаксиальных структур: для этого необходимо проводить исследования при больших дозах облучения. Кроме того, для более глубокого понимания процессов, происходящих при облучении и термообработке, необходимо выявлять температурные зависимости электрофизических характеристик (от +200 °C до гелиевых температур) совместно с глубокими структурными исследованиями.

Литература:

1. Ячменев А.Э., Рыжый В.И., Мальцев П.П., Повышение быстродействия прибора РНЕМТ на основе GaAs с помощью профилированного дельта-легирования оловом // Российский технологический журнал. 2017. Т. 5. № 2. С. 40–46.

2. Глинский И.А., Зенчиков Н.В., Мальцев П.П. Тепловое моделирование терагерцового квантово-каскадного лазера на основе наногетероструктуры GaAs/AlGaAs // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4 № 3. С. 27–36.

3. Уваров Е.Ф. Радиационные эффекты в широкозонных полупроводниках А^шВ^v. М.: Изд-во ЦНИИ Электроника, 1978. 77 с. – Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. Вып. 13.

4. Аствацатурьян Е.Р., Громов Д.В., Елесин В.В. [и др.] Радиационные эффекты в GaAs-полупроводниковых приборах и интегральных схемах // Зарубежная электронная техника. 1988. № 1. С. 48–85.

5. Оболенский С.В. Определение электрофизических констант GaAs при радиационном воздействии // Труды 2-го совещания по проекту НАТО SfP-973799 Semiconductor. Нижний Новгород, 2002. С. 146–154.

6. Акчурин Р.Х., Мармалюк А.А. МОС-гидридная эпитаксия в технологии материалов фотоники и электроники. М.: Техносфера, 2018. 488 с.

7. Вигдорович Е.Н., Рыжиков И.В. Влияние облучения на свойства гетероструктур AlInGaN // Тезисы докладов 11-й Всерос. конф. «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы». Москва, 1-3 февраля 2017. С. 102–103.

8. Кондратенко В.С., Абдулаев О.Р., Рыжиков И.В., Виноградов В.С., Фирсов А.С. Сравнительные исследования воздействия проникающей радиации на светодиоды нового поколения на основе AlGaInP и AlInGaN гетероструктур // Приборы. 2009. № 3(105). С. 41–49.

9. Градобоев А.В., Орлова К.Н., Асанов И.А. Деградация параметров гетероструктур AlGaInP при облучении быстрыми нейтронами и гамма-квантами // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2013. № 2. С. 64–66.

10. Градобоев А.В., Рубанов П.В. Деградация светодиодов на основе гетероструктур AlGaAs при облучении электронами // Изв. вузов. Физика. 2011. Т. 54. № 1/2. С. 195–197.

11. Градобоев А.В., Рубанов П.В., Скакова И.М. Деградация светодиодов на основе гетероструктур InGaN/GaN при облучении гамма-квантами // Изв. вузов. Физика. 2011. Т. 54. № 1/2. С. 190–194.

12. Беляев А.Е., Болтовец Н.С., Конакова Р.В., Миленин В.В., Свешников Ю.Н., Шеремет В.Н. Радиационные повреждения контактных структур с диффузионными барьерами, подвергнутых γ-облучению ⁶⁰Со // Физика и техника полупроводников. 2010. Т. 44. № 4. С. 467–475.

References:

1. Yachmenev A.E., Ryzhii V.I., Maltsev P. P. GaAs PHEMT performance increase using Delta-doping in the form of nanowires of tin. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2017; 5(2):40-46. (in Russ.)

2. Glinsky I., Zenchikov N.V., Maltsev P.P., Thermal modelling of terahertz quantum-

cascade laser based on nanoheterostructures GaAs/AlGaAs. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2016; 4(3):27-36. (in Russ.)

3. Uvarov E.F. Radiation effects in wide-bandgap semiconductors A^{III}B^v. M.: Publishing House of Central Research Institute of Electronics, 1978. 77 p. (in Russ.)

4. Astvatsaturian R.E., Gromov D.V., Elesin V.V. [et al.] Radiation effects in GaAs semiconductor devices and integrated circuits. *Zarubezhnaya elektronnaya tekhnika* (Foreign Electronics). 1988; 1:48-85. (in Russ.)

5. Obolensky S.V. Electrophysical characteristics determination of GaAs subject to radiation influence. Proceed. of the 2nd Meeting of the NATO project SfP-973799. Semiconductor. Nizhniy Novgorod, 2002. P. 143-154. (in Russ.)

6. Akchurin R.Kh., Marmalyuk A.A. MOS-hydride epitaxy in the technology of materials of photonics and electronics. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2018. 488 p. (in Russ.)

7. Vigdorovich E.N., Ryzhikov I.V. Effect of irradiation on the properties of AlInGaN heterostructures. Abstracts of the 11th All-Russian Conference «Nitrides of gallium, indium and aluminum - structures and devices». Moscow, 1-3 February, 2017. P. 102-103. (in Russ.)

8. Kondratenko V.S., Abdulaev O.R., Ryzhikov I.V., Vinogradov V.S., Firsov A.S. Comparative studies of the effect of penetrating radiation on new generation of LEDs based on AlGaInP and AlInGaN heterostructures. *Pribory* (Instruments). 2009; 3(105):41-49. (in Russ.)

9. Gradoboev A.V., Orlova K.N. Asanov I.A. Parameter degradation of heterostructures AlGaInP at radiation by fast neutrons and gamma quantums. *Voprosy atomnoiy nauki i tekhniki*. *Seria: phizika radiozhionnogo vozdeystviya na radioelektronnuue apparaturu*. (Questions of atomic science and technics. Series: Physics of radiation effect on radio-electronic equipment). 2013; 2:64-66. (in Russ.)

10. Gradoboev A.V., Rubanov P.V. Degradation of LEDs based on heterostructures AlGaAs by irradiation with electrons. *Izvestiya VUZov. Phizika* (Russian Physics Journal). 2011; 54(1/2):195-197. (in Russ.)

11. Gradoboev A.V. Rubanov P.V., Skakova I.M. LED degradation based on InGaN/GaN heterostructures under gamma-ray irradiation. *Izvestiya VUZov. Phizika* (Russian Physics Journal). 2011; 54(1/2):190-194. (in Russ.)

12. Belyaev A.E., Boltovets N.S., Konakova R.V., Milenin V.V., Sveshnikov Yu.N, Sheremet V.N. Radiation damage of contact structures with diffusion barriers exposed to irradiation ⁶⁰Co γ -ray photons. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov (Semiconductors / Physics of the Solid State)*. 2010; 44(4):448-456.

Об авторе:

Вигдорович Евгений Наумович, доктор технических наук, профессор кафедры оптических и биотехнических систем и технологий Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (Россия, 107996, Москва, ул. Стромынка, д. 20).

About the author:

Evgeny N. Vigdorovich, D.Sc. (Engineering), Professor of the Chair of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (20, Stromynka st., Moscow 107996, Russia).

Для цитирования: Вигдорович Е.Н. Радиационная стойкость эпитаксиальных структур на основе GaAs // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 3. С. 41–49. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-41-49

For citation: Vigdorovich E.N. Radiation resistance of epitaxial structures based on GaAs. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2019; 7(3):41-49. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-41-49

УДК 535.218

DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-50-58

Динамика намагниченности в многослойных структурах TbCo/FeCo под действием фемтосекундного оптического возбуждения

Н.А. Ильин¹, А.А. Климов¹, N. Tiercelin², P. Pernod², E.Д. Мишина^{1,@}, M.С. Гапонов¹, K.А. Брехов¹, A.С. Сигов¹, B.Л. Преображенский³

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия ²University Lille, CNRS, Centrale Lille, ISEN, Univ. Valenciennes, UMR 8520 - IEMN, F-59000 Lille, France ³Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва 119991, Россия [®]Автор для переписки, e-mail: mishina_elena57@mail.ru

Необходимость исследования сверхбыстрых процессов в магнетизме обусловлена перспективами создания сверхбыстрой магнитной записи и сверхбыстрых спинтронных устройств. Для возбуждения магнитной подсистемы, выражающегося в спиновой прецессии, используются фемтосекундные оптические импульсы. В металлах, вследствие значительного оптического поглощения, в первую очередь происходит нагрев материала и значительные джоулевы потери. Важнейшей задачей является поиск материалов, в которых спиновые процессы возбуждаются без нагрева. Очевидными кандидатами являются слабо поглощающие материалы, например, феррит-гранаты. Однако набор таких материалов и спектр их функциональных возможностей ограничен. Целью данной работы является выявление особенностей динамики систем с нетепловыми механизмами возбуждения спиновой прецессии. Такое возбуждение возможно в гетероструктурах ферромагнетик/аниферромагнетик с обменным взаимодействием при условии, что время рекомбинации фотоносителей меньше, чем время диффузии тепла. Исследованы на фемтосекундный оптический импульс ближнего ИК-диапазона многослойные структуры TbCo/FeCo. Проведено сравнение спиновой динамики при направлении волнового вектора возбуждающего импульса вдоль и перпендикулярно оси легкого намагничивания структур (геометрии «легкая ось» и «трудная ось», соответственно). Показано, что в геометрии «легкая ось» определяющим является тепловой механизм взаимодействия, который при воздействии возбуждающего импульса приводит к уменьшению проекции намагниченности на направление распространения пробного луча. В геометрии «трудная ось» на начальном этапе намагниченность разворачивается к магнитному полю, а затем,

© creative commons

прецессируя, релаксирует к равновесной угловой ориентации. Такая динамика указывает на быстрое восстановление величины поля одноосной анизотропии после лазерного воздействия. Представленные результаты демонстрируют сверхбыстрое изменение магнитной анизотропии, наведенной в процессе изготовления исследуемой гетероструктуры, что может представлять интерес для оптического управления ориентацией намагниченности.

Ключевые слова: магнитные гетероструктуры, оптическое управление намагниченностью, сверхбыстрое размагничивание, сверхбыстрое изменение магнитной анизотропии, фемтосекундное лазерное излучение.

Dynamics of Magnetization in Multilayer TbCo / FeCo Structures under the Influence of Femtosecond Optical Excitation

Nikita A. Ilyin¹, Alexey A. Klimov¹, Nicolas Tiercelin², Philippe Pernod², Elena D. Mishina^{1,@}, Mikhail S. Gaponov¹, Kirill A. Brekhov¹, Alexander S. Sigov¹, Vladimir L. Preobrazhensky³

¹MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia ²University Lille, CNRS, Centrale Lille, ISEN, Univ. Valenciennes, UMR 8520 - IEMN, F-59000 Lille, France ³Prokhorov General Physics Institute, Moscow 119991, Russia [@]Corresponding author e-mail: mishina elena57@mail.ru

The need to study ultrafast processes in magnetism is due to the prospects for creating ultrafast magnetic recording and ultrafast spintronic devices. In order to excite the magnetic subsystem femtosecond optical pulses are used. The excitement is manifested as in spin precession. In metals, the material is heated first due to significant optical absorption, and significant Joule losses occur. The most important task is to search for materials in which spin processes are excited without heating. Obvious candidates are weakly absorbing materials, such as ferrite garnets. However, the range of such materials and the range of their functionality are limited. The purpose of this work is to study the dynamics of systems with nonthermal mechanisms of spin precession excitation. Such excitation is possible in ferromagnetic / antiferromagnetic heterostructures with exchange interaction, provided that the recombination time of photocarriers is shorter than the time of heat diffusion. Multilayer TbCo / FeCo structures of the near IR range were investigated for a femtosecond optical pulse. The spin dynamics are compared with the direction of the wave vector of the exciting pulse along and perpendicular to the axis of easy magnetization of the structures ("easy axis" and "hard axis" geometry, respectively). It is shown that in case of "easy axis" geometry the determinative mechanism is the thermal interaction. When the system is exposed to an excitation pulse, this mechanism leads to a decrease in the projection of magnetization on the direction of propagation of the test beam. In case of "hard axis" geometry, the magnetization turns to the magnetic field at the initial stage. Then it precesses and relaxes to an equilibrium angular orientation. Such dynamics indicate a rapid recovery of the uniaxial anisotropy field after laser irradiation. The presented results demonstrate an ultrafast change in the magnetic anisotropy induced during the fabrication of the heterostructure under study, which may be of interest for optical control of the orientation of the magnetization.

Keywords: magnetic heterostructures, optical control of magnetization, ultrafast demagnetization, ultrafast change in magnetic anisotropy, femtosecond laser light.

И нтерес к исследованию сверхбыстрых процессов в магнетизме связан, прежде всего, с перспективами создания сверхбыстрой магнитной записи и сверхбыстрых спинтронных устройств [1–3]. Оптимизация разрабатываемых материалов и устройств требует глубокого понимания процессов, происходящих на временной шкале от десятков фемтосекунд до десятков пикосекунд и затрагивающих электронную, спиновую и решеточную подсистемы. Для возбуждения магнитной подсистемы, выражающегося в спиновой прецессии, используются фемтосекундные оптические импульсы. Поведение магнитной подсистемы регистрируется с помощью эффекта Керра в схеме оптического возбуждения-зондирования [1].

В металлах, вследствие значительного оптического поглощения, в первую очередь происходит нагрев материала, обусловливающий значительные джоулевы потери. Важнейшей задачей является поиск материалов, в которых спиновые процессы возбуждаются без нагрева. Очевидными кандидатами являются слабо поглощающие материалы, например, феррит-гранаты [4]. Однако набор таких материалов и спектр их функциональных возможностей ограничен. Другой подход, применимый и к поглощающим материалам, заключается в использовании взаимодействия между магнитными и фотовозбужденными носителями при условии, что время рекомбинации фотоносителей намного короче по сравнению с процессом диффузии тепла. Ранее [5, 6] было показано, что короткие лазерные импульсы могут вызывать нетепловую переориентацию спинов в антиферромагнитных (АФМ) материалах гораздо быстрее, чем в ферромагнитных (ФМ). На этой основе созданы ФМ/АФМ-гетероструктуры с обменным взаимодействием [7] и продемонстрировано, что в таких структурах эффективность возбуждения спиновой прецессии существенно выше, чем в чистом ФМ-материале.

В настоящей работе нами исследован магнитооптический отклик многослойных структур TbCo/FeCo на фемтосекундный оптический импульс ближнего ИК-диапазона. Проведено сравнение спиновой динамики при направлении волнового вектора возбуждающего импульса вдоль и перпендикулярно оси легкого намагничивания структур.

Эксперименты выполняли на образцах, состоящих из чередующихся слоев TbCo₂ и FeCo толщиной 5 нм каждый на подложке диоксида кремния (далее будем обозначать их как TbCo/FeCo). Образцы изготавливали методом катодного распыления в постоянном магнитном поле, используемом с целью создания наведенной одноосной магнитной анизотропии в плоскости структуры, как описано в [8]. Полная толщина структур составляла 60 нм.

Образцы тестировали с помощью вибрационного магнетометра¹, кривые намагничивания типичны для одноосных магнитных структур. По данным измерений, величина

¹Тестирование проводили во Франции, в Университете г. Лилль, Институт электроники, микроэлектроники и нанотехнологии – IEMN – UMR 8520, F-59000, Lille, France.

намагниченности насыщения и напряженность поля анизотропии составили, соответственно, В_s = 5500 Гс и Н_a = 7 кЭ. Для направления намагничивания по «легкой оси» определена коэрцитивная сила Н_с = 400 Э. В качестве источника излучения использовали титан-сапфировый фемтосекундный лазер TiF-20F (ООО «АВЕСТА-ПРОЕКТ», г. Троицк), излучение которого заводилось в оптический усилитель. На выходе из усилителя излучение имело параметры: длина волны 800 нм, частота повторения импульсов 3 кГц, длительность импульса 35 фс. После этого излучение разделялось светоделителем на канал возбуждения и канал зондирования. Плотность энергии на поверхности образца в импульсе возбуждения составляла порядка 0.85 мДж/см², в импульсе зондирования 0.085 мДж/см². Луч накачки перпендикулярен поверхности образца; угол падения зондирующего луча равен 45°. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Образец помещали между сердечниками электромагнита, позволявшего прикладывать магнитное поле до 650 мТ. Поляризация волн возбуждения и зондирования линейная, вектор электрического поля обеих волн лежал в той же плоскости, что и вектор напряженности магнитного поля электромагнита. Вращением вокруг нормали к поверхности образец устанавливали в двух положениях так, чтобы волновой вектор возбуждающего импульса ориентировался либо вдоль, либо перпендикулярно оси легкого намагничивания структуры.



Рис. 1. Схема эксперимента: а – вид сверху, б – вид сбоку.
Цифрами на рисунках обозначены две геометрии эксперимента:
1) «легкая ось» (лежит в плоскости падения);
2) «трудная ось» (перпендикулярна плоскости падения).

Для детектирования применяли балансный фотодиод, который позволяет одновременно определять угол поворота плоскости поляризации и интенсивность отраженной волны. Улучшение отношения сигнал/шум обеспечивалось за счет оптомеханического прерывателя, модулирующего интенсивность возбуждающей волны и синхронизованный с синхронным усилителем.

На рис. 2 представлены результаты исследования возбуждения-релаксации магнитной подсистемы гетероструктуры (TbCo₂/FeCo) при возбуждении ее фемтосекундным лазерным импульсом для случая, когда ось легкого намагничивания образца лежит в плоскости падения (геометрия «легкая ось»). Зависимости угла поворота плоскости поляризации от времени задержки (максимальное время задержки 160 пс) между импульсом зондирования относительно импульса возбуждения имеет вид, характерный для экспериментов оптического возбуждения-зондирования [9]. На временах порядка 1–2 пс происходит возбуждение электронов оптическим импульсом и их термализация, на временах нескольких десятков пикосекунд имеет место несколько процессов: возбуждение спиновой подсистемы, возбуждение фононов за счет электрон-фононного взаимодействия, а также размагничивание; далее все перечисленные процессы со своими постоянными времени каждый релаксируют к исходному состоянию.



Рис. 2. Геометрия «легкая ось». Зависимость угла поворота плоскости поляризации от времени задержки при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля (точки – экспериментальные зависимости, линии – результаты аппроксимации).

В зависимостях, полученных в наших экспериментах, можно отметить три особенности:

1) нечетность по полю, которая выражается в виде симметрии относительно горизонтальной оси кривых, снятых в противоположных по направлению полях;

2) при увеличении поля практически сразу же после термализации носителей (1-2 пс) начинают проявляться осцилляции, обусловленные спиновой прецессией; частота осцилляций увеличивается с увеличением поля;

3) за время измерения 160 пс, приведенное на рис. 2, а также вплоть до 800 пс (что является пределом используемой установки), не наблюдается релаксации угла поворота поляризации к начальному значению. Следовательно, в геометрии «легкая ось» система достаточно быстро релаксирует к новому состоянию, и вокруг этого нового состояния происходит прецессия спинов.

На рис. 3 представлены результаты аналогичных измерений для случая, когда ось легкого намагничивания образца перпендикулярна плоскости падения (геометрия «трудная ось»). В отличие от предыдущего случая, зависимости являются четными, то есть совпадают (в пределах погрешности) для магнитных полей противоположных знаков и одинаковой величины. В связи с этим временные зависимости угла поворота плоскости поляризации на рис. За приведены только для поля одного знака. Характерные особенности этих зависимостей следующие:

1) осцилляции спиновой прецессии начинают проявляться только при достаточно значительных временах (в зависимости от поля – в интервале 30–50 пс);

2) осцилляции проявляются практически на фоне нулевого сигнала, то есть и само размагничивание, и его релаксация происходят за достаточно короткие времена (30–50 пс), а сама система переходит в начальное состояние.



Рис. 3. Геометрия «трудная ось». Зависимость угла поворота плоскости поляризации от времени задержки при различных значениях величины внешнего магнитного поля (точки – экспериментальные зависимости, линии – результаты аппроксимации).

Полученные результаты можно аппроксимировать феноменологической зависимостью (модифицированной на основе работы [10]) для угла керровского вращения:

$$\theta_{K} = \left(bg + A \cdot e^{-t/t_{0}} + B \cdot \sin\left(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi_{0}\right) \cdot e^{-t/\tau} \left(1 - erf\left(B - \psi_{0}t\right)\right),$$

где в первой скобке первый член bg представляет собой фоновый сигнал, близкий к нулю;

второй член описывает восстановление намагниченности с постоянной времени t_0 ;

третий член описывает затухающую с постоянной времени τ динамику прецессии намагниченности;

f-частота прецессии;

φ₀ – начальная фаза;

А и В – амплитуды соответствующих процессов.

Модификация выражения, приведенного в работе [10], заключается в добавлении множителя с функцией ступеньки, чтобы описать не только релаксацию, но также и возбуждение намагниченности. Результаты аппроксимации – сплошные линии на рис. 2 и 3. Полученные при аппроксимации частоты увеличиваются с ростом магнитного поля и практически совпадают для обеих геометрий «легкой» и «трудной» осей.

Приведенные экспериментальные результаты позволяют выявить основные особенности оптически индуцированных процессов в спиновой системе исследуемой гетероструктуры. С феноменологической точки зрения, эти особенности магнитной динамики обусловлены, прежде всего, характером воздействия лазерных импульсов на величину намагниченности и напряженность поля наведенной магнитной анизотропии. В условиях теплового механизма оптического возбуждения естественно ожидать, что оба параметра уменьшению проекции намагниченности на направление распространения пробного луча. Соответственно, увеличивается отклонение угла поворота поляризации света от равновесного направления в эффекте Керра. При этом отклонение меняет знак при изменении знака намагничивающего поля, что и наблюдается в эксперименте. В геометрии «трудная ось» отчетливо проявляется зависимость реакции на лазерное возбуждение от исходного состояния магнитной системы. В использованных в эксперименте магнитных полях равновесная намагниченность находится в угловой фазе. В поле наибольшей напряженности H = 6.3 кЭ при поле анизотропии H_A = 7 кЭ угол между проекцией намагниченности на плоскость образца и «легкой осью» близок к 45°. Уменьшение напряженности поля приводит к повороту намагниченности в сторону «легкой оси». Данные, представленные на рис. 3, соответствуют зависимости угла поворота плоскости поляризации света от напряженности магнитного поля при спиновой переориентации в случае поля, направленного перпендикулярно к «легкой оси». Поскольку лазерное возбуждение проводится при скомпенсированном равновесном повороте плоскости поляризации, строгая корреляция динамического отклика с ориентацией намагниченности в равновесном состоянии указывает на частичное оптическое разрушение исходного анизотропного магнитного состояния. На начальном этапе намагниченность разворачивается к магнитному полю, а затем, прецессируя, релаксирует к равновесной угловой ориентации. Такая динамика указывает на быстрое восстановление величины поля одноосной анизотропни после лазерного воздействия.

В заключение отметим, что представленные результаты демонстрируют сверхбыстрое изменение магнитной анизотропии, наведенной в процессе изготовления исследуемой гетероструктуры, что может представлять интерес для оптического управления ориентацией намагниченности. Обнаруженные в геометрии «легкая ось» длительные релаксационные процессы на временах, превосходящих время измерений, требуют самостоятельного исследования.

Работа выполнена при поддержке CNRS и РФФИ (грант № 18-52-16021), а также Минобрнауки в рамках госзадания вузам (16.4699.2017/6.7 и 3.1923.2017/4.6).

Литература:

1. Sander D., Valenzuela S.O., Makarov D., Marrows C.H., Fullerton E.E., Fischer P., McCord J., Vavassori P., Mangin S., Pirro P., Hillebrands B., Kent A.D., Jungwirth T., Gutfleisch O., Kim C.G., Berger A. The 2017 Magnetism Roadmap // J. Phys. D. Appl. Phys. 2017. V. 50. № 36. P. 363001 (33 pp.).

2. Beaurepaire E., Merle J.-C., Daunois A., Bigot J.-Y. Ultrafast spin dynamics in ferromagnetic nickel // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 76. № 22. P. 4250–4253. DOI: https://doi. org/10.1103/PhysRevLett.76.4250

3. Kirilyuk A., Kimel A.V., Rasing T. Ultrafast optical manipulation of magnetic order // Rev. Mod. Phys. 2010. V. 82. № 3. P. 2731–2784. DOI: https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.2731

4. Stupakiewicz A., Szerenos K., Afanasiev D., Kirilyuk A., Kimel A.V. Ultrafast nonthermal photo-magnetic recording in a transparent medium // Nature. 2017. V. 542. № 7639. P. 71–74.

5. Kimel A.V., Kirilyuk A., Tsvetkov A., Pisarev R. V., Rasing T. Laser-induced ultrafast spin reorientation in the antiferromagnet TmFeO₃ // Nature. 2004. V. 429. № 6994. P. 850–853. DOI: 10.1038/nature 02659.

6. Kimel A.V., Kirilyuk A., Usachev P.A., Pisarev R. V., Balbashov A.M., Rasing T. Ultrafast non-thermal control of magnetization by instantaneous photomagnetic pulses // Nature. 2005. V. 435. № 7042. P. 655–657. DOI: 10.1038/nature 03564.

7. Ma X., Fang F., Li Q., Zhu J., Yang Y., Wu Y.Z., Zhao H.B., Lüpke G. Ultrafast spin exchange-coupling torque via photo-excited charge-transfer processes. // Nat. Commun. 2015. V. 6. № 1. P. 8800. DOI: 10.1038/ncomms9800.

 Klimov A., Tiercelin N., Preobrazhensky V., Pernod P. Inhomogeneous spin reorientation transition (SRT) in giant magnetostrictive TbCo₂/FeCo multilayers // INTERMAG 2006
 IEEE International Magnetics Conference. 2006. P. 452–452. https://doi.org/10.1109/ INTMAG.2006.376176

9. Koopmans B., Malinowski G., Dalla Longa F., Steiauf D., Fähnle M., Roth T., Cinchetti M., Aeschlimann M. Explaining the paradoxical diversity of ultrafast laser-induced demagnetization // Nature Materials. 2009. V. 9. № 3. P. 259–265. DOI: 10.1038/NMAT2593

10. He P., Ma X., Zhang J.W., Zhao H.B., Lüpke G., Shi Z., Zhou S.M. Quadratic scaling of intrinsic gilbert damping with spin-orbital coupling in FePdPt films: Experiments and *Ab Initio* calculations // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. № 7. P. 077203-5. DOI: 10.1103/ PhysRevLett.110.077203

References:

1. Sander D., Valenzuela S.O., Makarov D., Marrows C.H., Fullerton E.E., Fischer P., McCord J., Vavassori P., Mangin S., Pirro P., Hillebrands B., Kent A.D., Jungwirth T., Gutfleisch O., Kim C.G., Berger A. The 2017 Magnetism Roadmap. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2017; 50(36): 363001 (33 pp.).

2. Beaurepaire E., Merle J.-C., Daunois A., Bigot J.-Y. Ultrafast spin dynamics in ferromagnetic nickel. *Phys. Rev. Lett.* 1996; 76(22):4250-4253. DOI: https://doi.org/10.1103/ PhysRevLett.76.4250

3. Kirilyuk A., Kimel A.V., Rasing T. Ultrafast optical manipulation of magnetic order. *Rev. Mod. Phys.* 2010; 82(3): 2731-2784. DOI: https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.2731

4. Stupakiewicz A., Szerenos K., Afanasiev D., Kirilyuk A., Kimel A.V. Ultrafast nonthermal photo-magnetic recording in a transparent medium. *Nature*. 2017; 542(7639): 71-74.

5. Kimel A.V., Kirilyuk A., Tsvetkov A., Pisarev R.V., Rasing T. Laser-induced ultrafast spin reorientation in the antiferromagnet TmFeO₃. *Nature*. 2004; 429(6994):850-853. DOI: 10.1038/nature 02659.

6. Kimel A.V., Kirilyuk A., Usachev P.A., Pisarev R.V., Balbashov A.M., Rasing T. Ultrafast non-thermal control of magnetization by instantaneous photomagnetic pulses. *Nature*. 2005; 435(7042):655-657. DOI: 10.1038/nature 03564.

7. Ma X., Fang F., Li Q., Zhu J., Yang Y., Wu Y.Z., Zhao H.B., Lüpke G. Ultrafast spin exchange-coupling torque via photo-excited charge-transfer processes. *Nat. Commun.* 2015; 6(1):8800. DOI: 10.1038/ncomms9800.

8. Klimov A., Tiercelin N., Preobrazhensky V., Pernod P. Inhomogeneous spin reorientation transition (SRT) in giant magnetostrictive TbCo₂/FeCo multilayers. *INTERMAG* 2006 – *IEEE International Magnetics Conference*. 2006; 452-452. https://doi.org/10.1109/ INTMAG.2006.376176

9. Koopmans B., Malinowski G., Dalla Longa F., Steiauf D., Fähnle M., Roth T., Cinchetti M., Aeschlimann M. Explaining the paradoxical diversity of ultrafast laser-induced demagnetization. *Nature Materials*. 2009; 9(3):259-265. DOI: 10.1038/NMAT2593

10. He P., Ma X., Zhang J.W., Zhao H.B., Lüpke G., Shi Z., Zhou S.M. Quadratic scaling of intrinsic gilbert damping with spin-orbital coupling in FePdPt films: Experiments and *Ab Initio* calculations. *Phys. Rev. Lett.* 2013; 110(7):077203-5. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.077203

Об авторах:

Ильин Никита Александрович, кандидат физ.-мат. наук, научный сотрудник лаборатории фемтосекундной оптики для нанотехнологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Author ID: 18037137700. E-mail: alexander-nick@bk.ru

Климов Алексей Анатольевич, кандидат физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры информационных системы Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Author ID: 35391085300. E-mail: klimov@mirea.ru

Tiercelin Nicolas, Charge de Recherche CNRS-HDR, Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, ISEN, Univ. Valenciennes, UMR 8520 – IEMN, 59651 Villeneuve d'Ascq, France. http://orcid.org/0000-0001-7400-4272, Author ID: 6603515103. E-mail: nicolas.tiercelin@univ-lille.fr

Pernod Philippe, CNRS-HDR, Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, ISEN, Univ. Valenciennes, UMR 8520 – IEMN, 59651 Villeneuve d'Ascq, France. Author ID:7003429648. E-mail: philippe.pernod@iemn.univ-lille.fr

Мишина Елена Дмитриевна, доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией фемтосекундной оптики для нанотехнологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). http://orcid.org/0000-0003-0387-5016, Author ID:7005350309. E-mail: mishina elena57@mail.ru

Гапонов Михаил Станиславович, аспирант кафедры наноэлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). https://orcid.org/0000-0003-0003-5054. E-mail: gaponov.m.s@yandex.ru

Брехов Кирилл Алексеевич, младший научный сотрудник лаборатории фемтосекундной оптики для нанотехнологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). http://orcid.org/0000-0001-9091-2609, Author ID: 55452447100, E-mail: brekhov_ka@mail.ru

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой наноэлектроники Физико-технологического института, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Author ID: 35557510600. E-mail: sigov@mirea.ru

Преображенский Владимир Леонидович, доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН (119991, Россия, Москва, ул. Вавилова, д. 38). http://orcid.org/0000-0002-6206-5948, Author ID: 7004493603. E-mail: preobr@newmail.ru

About the authors:

Nikita A. Ilyin, Ph.D. (Physics and Mathematics), Researcher of the Laboratory of Femtosecond Optics for Nanotechnologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Author ID: 18037137700. E-mail: alexander-nick@bk.ru

Alexey A. Klimov, Ph.D. (Physics and Mathematics), Docent, Associate Professor of the Chair of Information Systems, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Author ID: 35391085300. E-mail: klimov@mirea.ru

Nicolas Tiercelin, Charge de Recherche CNRS-HDR, Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, ISEN, Univ. Valenciennes, UMR 8520 – IEMN, 59651 Villeneuve d'Ascq, France. http://orcid.org/0000-0001-7400-4272. Author ID: 6603515103. E-mail: nicolas.tiercelin@univ-lille.fr

Philippe Pernod, CNRS-HDR, Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, ISEN, Univ. Valenciennes, UMR 8520 – IEMN, 59651 Villeneuve d'Ascq, France, Author ID: 7003429648. E-mail: philippe.pernod@iemn.univ-lille.fr

Elena D. Mishina, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Laboratory of Femtosecond Optics for Nanotechnologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). http://orcid.org/0000-0003-0387-5016, Author ID:7005350309. E-mail: mishina elena57@mail.ru

Mikhail S. Gaponov, Postgraduate Student of the Chair of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). https://orcid.org/0000-0003-0003-5054. E-mail: gaponov.m.s@yandex.ru

Kirill A. Brekhov, Junior Researcher of the Laboratory of Femtosecond Optics for Nanotechnologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). http://orcid.org/0000-0001-9091-2609, Author ID: 55452447100. E-mail: brekhov ka@mail.ru

Alexander S. Sigov, Academician, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Chair of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology of the MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Author ID: 35557510600. E-mail: sigov@mirea.ru

Vladimir L. Preobrazhensky, D.Sc. (Physics and Mathematics), Chief Researcher of the A.M. Prokhorov Institute of General Physics RAS (38, Vavilova st., Moscow 119991, Russia). http://orcid.org/0000-0002-6206-5948, Author ID: 7004493603. E-mail: preobr@newmail.ru

Для цитирования: Ильин Н.А., Климов А.А., Tiercelin N., Pernod P., Мишина Е.Д., Гапонов М.С., Брехов К.А., Сигов А.С., Преображенский В.Л. Динамика намагниченности в многослойных структурах TbCo/FeCo под действием фемтосекундного оптического возбуждения // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 3. С. 50–58. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-50-58

For citation: Ilyin N.A., Klimov A.A., Tiercelin N., Pernod P., Mishina E.D., Gaponov M.S., Brekhov K.A., Sigov A.S., Preobrazhensky V.L. Dynamics of magnetization in multilayer TbCo / FeCo structures under the influence of femtosecond optical excitation *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2019; 7(3):50-58. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-50-58

МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 537.632.5

DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-59-68

Особенности моделирования магниторефрактивного эффекта в многослойных металлических наноструктурах

А.А. Мокрушина, А.Н. Юрасов[@]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия [@]Автор для переписки, e-mail: alexey_yurasov@mail.ru

Магниторефрактивный эффект (МРЭ) важен и интересен и с фундаментальной, и с практической точки зрения. Данный эффект заключается в изменении коэффициента отражения или прохождения электромагнитной волны от намагниченных структур, обладающих эффектами магнитосопротивления. Это может быть и гигантское, и туннельное, и колоссальное магнитосопротивление в зависимости от типа структуры. МРЭ наиболее ярко проявляется в ИК-области спектра и может достигать десятки процентов. Он характеризуется однозначной зависимостью от величины магнитосопротивления. В данной статье рассматриваются особенности МРЭ в многослойных металлических наноструктурах, обладающих гигантским магнитосопротивлением. Проведено исследование МРЭ с использованием модели, связывающей данный эффект с магнитосопротивлением, а также в рамках модели с учетом спин-зависящего рассеяния. Последняя модель в более ранних работах позволила хорошо описать качественно, а в отдельных случаях и количественно, ряд экспериментальных данных. Предложенный нами учет частотной зависимости сопротивления позволил улучшить первую модель и получить принципиально новый результат: надежное качественное и количественное описание величины эффекта. В статье отмечена ключевая возможность применения магниторефрактивного эффекта как бесконтактного метода исследования наноструктур, метода неразрушающего контроля любых элементов электроники. Проведено также сравнение с экспериментальными данными, продемонстрировавшее возможность эффективного описания связи МРЭ и магнитосопротивления в рамках двух рассмотренных моделей.

Ключевые слова: наноструктуры, магниторефрактивный эффект, магнитоотражение, магнитопропускание, магнитосопротивление, спин-зависящее рассеяние.



Features of Modeling of the Magnetorefractive Effect in Multilayered Metal Nanostructures

Anastasia A. Mokrushina, Alexey N. Yurasov[@]

MIREA – *Russian Technological University, Moscow 119454, Russia @Corresponding author e-mail: alexey_yurasov@mail.ru*

The magnetorefractive effect (MRE) is important and interesting from both fundamental and practical points of view. This effect consists in a change in the reflection coefficient or the passage of an electromagnetic wave from magnetized structures with magnetoresistance effects. It can be giant, tunnel and colossal magnetoresistance depending on the type of structure. MRE is most clearly manifested in the IR region of the spectrum and can reach tens of percent. It is possible to show its unambiguous dependence on the magnitude of the magnetoresistance. This article discusses the features of MRE in multilayer metal nanostructures with giant magnetoresistance. The MRE simulation is carried out using a model that relates this effect to magnetoresistance, as well as in the framework of the model taking into account spin-dependent scattering. The last model in earlier works allowed describing a number of experimental data well qualitatively and in some places quantitatively. In this paper, taking into account the frequency dependence of the resistance allowed us to improve the first model, which allowed us to obtain a good qualitative and quantitative description of the effect value - this is a fundamentally new result. The article highlighted the key opportunity for the application of magnetorefractive effect as a contactless method to study nanostructures, a method of nondestructive testing of all electronic components. A comparison with experimental data is also made. A good description is demonstrated in the framework of the two models considered, which can effectively describe the relationship between MRE and magnetoresistance

Keywords: nanostructures, magnetorefractive effect, magnetoreflection, magnetotransmission, magnetoresistance, spin-dependent scattering.

Введение

Наноструктуры являются весьма перспективными материалами с заслуживающими внимания магнитными, электрическими, оптическими, магнитооптическими и другими физическими свойствами [1]. Они находят применение, прежде всего, в электронике. Поиск новых вариантов использования данных структур представляет собой актуальную задачу.

Одним из наиболее интересных и принципиально важных разделов с точки зрения исследования наноструктур является магнитооптика, изучающая взаимодействие света с веществом в магнитном поле [2, 3]. При этом наблюдаются различные магнитооптические эффекты, среди которых следует выделить магниторефрактивный эффект (МРЭ) [4]. МРЭ можно рассматривать как высокочастотный аналог магнитосопротивления (МС), и величина МРЭ – это относительное изменение коэффициентов отражения и прохождения света для структур с гигантским, туннельным или колоссальным магнитосопротив-

лением в магнитном поле [5]. МРЭ относится к бесконтактным методам исследования наноструктур [6], т.е. методам неразрушающего контроля, которые можно использовать и для изучения наноструктур, и для поиска новых материалов, и для построения теоретических моделей магниторефрактивного эффекта в наноструктурах.

В настоящей работе МРЭ рассматривают в металлических мультислойных пленках, обладающих эффектом гигантского магнитосопротивления [6–14].

Расчеты проводили в рамках двух моделей, и полученные результаты сравнивали с экспериментальными данными для структуры glass/Cr (50 Å)/[CoFe (14 Å)/Cu (9.5 Å)]₈/Cr (20 Å), которые были представлены группой исследователей под руководством Ю.П. Сухорукова и А.В. Телегина (Институт физики металлов УрО РАН) [13]. Особенностью описания наблюдаемых эффектов является учет спин-зависящего рассеяния.

Способы описания МРЭ

В отсутствие магнитного поля диэлектрическая проницаемость $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_1(\omega) - i\varepsilon_2(\omega)$ – скалярная величина, действительная и мнимая части которой определяются через индексы (коэффициенты) рефракции *n* и экстинкции *k*:

$$\operatorname{Re} \varepsilon(\omega) = \varepsilon_1(\omega) = n^2 - k^2, \ \operatorname{Im} \varepsilon(\omega) = \varepsilon_2(\omega) = 2nk.$$
(1)

Оптическая проводимость металла определяется как:

$$\sigma(\omega) = \frac{\omega nk}{2\pi} = \frac{\omega \operatorname{Im} \varepsilon(\omega)}{4\pi}.$$
(2)

В многослойных металлических наноструктурах зависимость диэлектрической проницаемости $\varepsilon(\omega, H)$ от проводимости $\sigma(\omega, H)$, в магнитном поле H можно рассмотреть в виде:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_r(\omega) - i \frac{4\pi\sigma(\omega)}{\omega}.$$
(3)

Здесь $\varepsilon_r(\omega)$ – диэлектрическая проницаемость, учитывающая вклад токов смещения.

Согласно работе [5], МРЭ может быть описан, как изменение коэффициентов отражения и пропускания электромагнитных волн для образцов с магниторезистивным эффектом при их намагничивании. Благодаря влиянию намагниченности на магнитосопротивление $\Delta \rho / \rho_0$ структуры, учитывается ее вклад в оптическую проводимость образца и, соответственно, в МРЭ:

$$\Delta \sigma = \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_H} = \frac{\Delta \rho}{\rho_0^2 \left[1 - \frac{\Delta \rho}{\rho_0}\right]}.$$
 (4)

где $\Delta \sigma$ – магнитопроводимость структуры;

$$\Delta \rho = \rho_H - \rho_0.$$

Нижний индекс *H* определяет значения величин во внешнем магнитном поле, а 0 – без него. При расчетах важно учитывать, что сопротивление имеет частотную зависимость и полученные в данной работе результаты учитывают этот факт.

Рассмотрим следующую модель: в магнитном поле коэффициент рефракции n и коэффициент экстинкции k – это $n_H = n + \Delta n$ и $k_H = k + \Delta k$ соответственно. Используя (1) и (2), окончательно получаем [14]:

$$\Delta n = \frac{2\pi\Delta\sigma}{\omega} \left(\frac{n+k}{n^2+k^2}\right),\tag{5}$$

$$\Delta k = \frac{2\pi\Delta\sigma}{\omega} \left(\frac{n-k}{n^2+k^2}\right). \tag{6}$$

Таким образом, главный вклад в изменение коэффициентов прямо пропорционален магнитопроводимости структуры.

Для расчета МРЭ в многослойной структуре используют формулы Френеля, в нашем случае в эффективной трехслойной среде [15]. Данные формулы справедливы для любых многослойных систем.

Формула для коэффициента отражения *R*:

$$R = |r_{jkl}^{p}|^{2}, r_{jkl}^{p} = \frac{r_{jk}^{p} + F_{k}^{2} r_{kl}^{p}}{1 + F_{k}^{2} r_{jk}^{p} r_{kl}^{p}}, r_{jk}^{p} = \frac{g_{j} n_{k}^{2} - g_{k} n_{j}^{2}}{g_{j} n_{k}^{2} + g_{k} n_{j}^{2}}, g_{jkl} = \sqrt{n_{jkl}^{2} - n_{1}^{2} \sin^{2} \phi},$$

$$F_{k} = \exp(-2\pi i \lambda^{-1} g_{k} d_{k}),$$
(7)

где ϕ – угол падения света из первого слоя;

j, k, l – порядковые номера слоев;

 d_{μ} – толщина соответствующего слоя;

λ – длина световой волны в вакууме;

i – мнимая единица;

r – парциальный коэффициент отражения в отдельном слое,

 F_k- фазовый множитель, ответственный за интерференцию и затухание излучения в k-слое структуры с толщиной d.

Аналогично, можно рассчитать и пропускание света *Т* многослойной системы [15]. Например, для трехслойной системы (воздух-наноструктура-воздух) её можно наглядно представить в виде:

$$T = |t_{123}|^2, t_{123} = \frac{t_{12}F_2 t_{23}}{1 + F_2^2 r_{12} r_{23}}.$$
(8)

Здесь и далее рассматривается нормальное падение света, в этом случае эффект МРЭ значительный по величине, а поляризационные компоненты естественного света равны:

$$r_{jkl}^{p} = -r_{jkl}^{s} = r_{jkl} \quad \text{i} \quad t_{jkl}^{p} = t_{jkl}^{s} = t_{jkl} \quad .$$
(9)

МРЭ рассчитывается, как изменение коэффициента отражения *R* образца при его намагничивании:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R(M=0) - R(M)}{R(M=0)},$$
(10)

где *М* – намагниченность образца в магнитном поле.

Аналогично рассчитывается эффект на прохождении. Таким образом по формулам (1)–(10) можно смоделировать МРЭ в любой многослойной структуре. Важно отметить, что МРЭ может иметь как положительный, так и отрицательный знак. Также в рамках вышеизложенной модели можно оценивать величину магнитосопротивления, если измерить оптические параметры и смоделировать частотную зависимость сопротивления, что имеет большое значение при сравнении с экспериментальными данными.

Второй вариант моделирования основан на следующем: учитывается спин-зависящее рассеяние электронов, являющееся основным механизмом магнитосопротивления в многослойных наноструктурах. Для учета спин-зависящего рассеяния использовалось известное выражение для диэлектрической проницаемости в пределе самоусреднения [16]:

$$\varepsilon = \varepsilon_{st} + \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2 \frac{i\omega\tau}{1 - i\omega\tau} \left(1 + \frac{m^2\beta^2}{\left(1 - i\omega\tau\right)^2 - m^2\beta^2}\right)$$
(11)

где m – относительная величина намагниченности системы $M/M_{\rm s}$,

 β – параметр спиновой асимметрии,

т – время релаксации.

Затем полученный результат подставляем в формулы Френеля и (10).

Таким образом, МРЭ в металлических наноструктурах рассматривается в рамках двух различных моделей, описанные выше. Результаты представлены в следующем разделе.

Расчет МРЭ спектров и сравнение с экспериментом

Рассчитаны спектры МРЭ на пропускание света для многослойной металлической структуры glass/Cr (50 Å)/[CoFe (14 Å)/Cu (9.5 Å)]₈/Cr (20 Å) при комнатной температуре и нормальном падении света на образец. Это необходимо для сравнения с экспериментальными данными, полученными при тех же условиях и геометрии.

В первом способе описания учитывались особенности металлических наноструктур через спин-зависящее рассеяние (11). Расчет проводился по формулам Френеля (8)–(10). Для расчета МРЭ была использована величина магнитосопротивления 5%, которая соответствовала экспериментальной. На рис. 1 представлены полученные результаты. Видно, что изменение времени релаксации существенным образом меняют величину, форму и знак МРЭ. Здесь же, на рис. 1 дано сравнение результатов моделирования и эксперимента.

Очевидно, что для пунктирной, красной и зеленой кривых в области длины волны со значением порядка 2.5 мкм наблюдается минимум. Красная линия и пунктирная после прохождения минимума выходят на качественное согласие с экспериментом. Из всех рассчитанных кривых именно они лучше всего описывают эксперимент. Отметим, что описание эксперимента в рамках данной модели не дает количественного согласия, а только порядок величины, что обусловлено необходимостью учета разных времен релаксации и различными квантовыми эффектами в тонких металлических пленках. Важно подчеркнуть, что



модель очень чувствительна к величине времени релаксации (рис. 1), и даже изменение его в пределах одного порядка приводит к существенному изменению спектров МРЭ.

Согласно второму методу, расчеты МРЭ проводили по формулам Френеля (8)–(10) с учетом изменения коэффициента рефракции n и коэффициента экстинкции k при включении магнитного поля (3). Расчетные данные также получены при нормальном падении света, при комнатной температуре для разных $\Delta \sigma$ (2) с учетом моделирования частотной зависимости сопротивления. Сравнение эксперимента с расчетными данными приведено на рис. 2.



Рис. 2. Спектры МРЭ на пропускании света ($\Delta T/T$): эксперимент – черная линия (квадраты); расчетные данные: для $\Delta \sigma = 10^{-13}$ – сплошная линия; для $\Delta \sigma = 10^{-12}$ – зеленая линия; для $\Delta \sigma = 10^{-11}$ – голубая линия.

Как видно из рис. 2, данный подход позволяет более адекватно описать эксперимент в отличие от первого способа. Наилучшее согласие наблюдается для зеленой кривой (рис. 2). Если сравнивать эти результаты с описанными ранее [16, 18], то именно учет частотной зависимости сопротивления позволяет вполне корректно описать экспериментальные результаты, полученные на качественном уровне для новых образцов металлических наноструктур glass/Cr (50 Å)/[CoFe (14 Å)/Cu (9.5 Å)]₈/Cr (20 Å) без использования спин-зависящего рассеяния, что является новым и важным результатом.

Заключение

В настоящей работе выполнено моделирование магниторефрактивного эффекта МРЭ в рамках двух подходов: первый – учитывает особенности металлических наноструктур через спин-зависящее рассеяние, второй – учитывает магнитосопротивление (магнитопроводимость) в явном виде, что позволяет при известных оптических параметрах и частотной зависимости сопротивления оценивать величину магнитосопротивления и сравнивать её с экспериментальной (в нашем случае эта величина составляла 5%). Моделирование проводили для металлической многослойной наноструктуры glass/Cr (50 Å)/[CoFe (14 Å)/Cu (9.5 Å)],/Cr (20 Å) в ИК-области спектра. Показано значительное влияние времени релаксации и изменения магнитопроводимости на МРЭ в первой и второй моделях, соответственно. Данные подходы позволяют качественно описывать МРЭ в металлических наноструктурах. Описание МРЭ может быть улучшено, если учесть наличие разных времен релаксации электронов и наличие различных квантовых эффектов. Основное достижение данной работы, по сравнению с предыдущими, заключается в усовершенствовании метода нахождения МРЭ для новых образцов металлических наноструктур через магнитосопротивление с учетом моделирования спектральной зависимости сопротивления, что, безусловно, важно для ИК-области спектра.

Литература:

1. Гороховский А.В. Композитные наноматериалы. Саратов: Изд-во СГТУ, 2008. 68 с.

2. Reig C., Cardoso de Freitas S., Mukhopadhyay S.C. Giant Magnetoresistance (GMR) Sensors. From Basis to State-of the-Art Applications. In Series: Smart Sensors, Measurement and Instrumentation. Volume 6. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2013. 301 p.

3. Ткачева В. Р. Нанокомпозиты – будущее машиностроения // Техника. Технологии. Инженерия. 2016. № 1. С. 37–40.

4. Jacquet J.C., Valet T. In: Magnetic ultrathin films, multilayers and surfaces. MRS Symp. Proc. 384. 1995. P. 477.

5. Грановский А.Б., Ганьшина Е.А., Юрасов А.Н. [и др.] Магниторефрактивный эффект в наноструктурах, манганитах и магнитофотонных кристаллах // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 9. С. 1152–1159.

6. Юрасов А.Н. Магниторефрактивный эффект, как бесконтактный метод исследования функциональных материалов // Материаловедение. 2014. № 6. С. 32–38.

7. Uran S., Grimsditch M., Fullerton E.E., Bader S.D. Infrared spectra of giant magnetoresistance Fe/Cr/Fe trilayers // Phys. Rev. B. 1998. V. 57. № 5. 1998. P. 2705-4. DOI: 10.1103/PhysRevB.57.2705

8. Kravets V.G., Bozec D., Matthew J.A.D., Thompson S.M., Menard H., Horn A.B., Kravets A.F. Correlation between the magnetorefractive effect, giant magnetoresistance, and optical properties of Co-Ag granular magnetic films // Phys. Rev. B. 2002. V. 65. № 5. P. 054 415-9. DOI: 10.1103/PhysRevB.65.054415

9. Грановский А., Гущин В., Быков И., Козлов А., Kobayashi N., Ohnuma S., Masumoto T., Inoue М. Гигантский магниторефрактивный эффект в магнитных гранулированных сплавах CoFe–MgF // Физика твердого тела. 2003. Т. 45. № 5. С. 867–869.

10. Granovsky A.B., Sukhorukov Yu.P., Gan'shina E.A., Telegin A.V. Magnetorefractive Effect in Magnetoresistive Materials. In: Springer Series in Materials Science. Magnetophotonics. From Theory to Applications. V. 178 / ed. by M. Inoue, M. Levy, A.V. Baryshev. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. P. 107–134.

11. Telegin A.V., Sukhorukov Yu.P., Loshkareva N.N., Mostovshchikova E.V., Bebenin N.G., Gan'shina E.A., Granovsky A.B. Giant magnetotransmission and magnetoreflection in ferromagnetic materials // J. Magn. Magn. Mater. 2015. V. 383. P. 104–109. DOI: 10.1016/j. jmmm.2014.11.080

12. Lobov I.D., Kirilova M.M., Makhnev A.A., Romashev L.N., Ustinov V. V. Parameters of Fe/Cr interfacial electron scattering from infrared magnetoreflection // Phys. Rev. B. 2010. V. 81. P. 134436-6. DOI: 10.1103/PhysRevB.81.134436

13. Банникова Н.С., Миляев М.А., Наумова Л.И., Проглядо В.В., Криницина Т.П., Каменский И.Ю., Устинов В.В. Гигантское магнитосопротивление сверхрешеток CoFe/ Cu(Ni₈₀Fe₂₀)₆₀Cr₄₀ // Физика металлов и материаловедение. 2015. Т. 116. № 10. Р. 1040.

14. Юрасов А.Н., Телегин А.В., Банникова Н.С., Миляев М.А., Сухоруков Ю.П.. Особенности магниторефрактивного эффекта в многослойной металлической наноструктуре [CoFe/Cu]n // Физика твердого тела. 2018. V. 60. № 2. Р. 276–282. DOI: 10.21883/ FTT.2018.02.45381.201

15. Маевский В.М. Теория магнетооптических эффектов в многослойных систем с произвольной ориентацией намагниченности // Физика металлов и материаловедение. 1985. Т. 5. № 2. С. 213–219.

16. Юрасов А.Н., Телегин А.В., Сухоруков Ю.П. Модель магниторефрактивного эффекта в манганитах в рамках теории эффективной среды // Физика твердого тела. 2016. Т. 58. № 4. С. 656–659.

References:

1. Gorokhovsky A.V. Composite Nanomaterials. Saratov: SGTU Publ. (Saratov State Technical University Publ.), 2008. 68 p. (in Russ.)

2. Reig C., Cardoso de Freitas S., Mukhopadhyay S.C. Giant Magnetoresistance (GMR) Sensors. From Basis to State-of the-Art Applications. In Series: Smart Sensors, Measurement and Instrumentation. Volume 6. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2013. 301 p.

3. Tkacheva V.R. Nanocomposites – the future of mechanical engineering. *Tekhnika*. *Tekhnologii. Inzheneriya* (Equipment. Technology. Engineering). 2016; (1):37-40. (in Russ.)

4. Jacquet J.C., Valet T. In: Magnetic ultrathin films, multilayers and surfaces. MRS Symp. Proc. 384. 1995. P. 477.

5. Granovsky A.B., Ganshina E.A., Yurasov A.N. [et al.] Magnetorefractive effect in

nanostructures, manganites, and magnetophotonic crystals. *Radiotekhnika i elektronika* (Radio Engineering and Electronics). 2007; 52(9):1152-1159. (in Russ.)

6. Yurasov A.N. Magnetorefractive effect as a contactless method for the study of functional materials. *Materialovedenie* (Materials Science). 2014; (6):32-38. (in Russ.)

7. Uran S., Grimsditch M., Fullerton E.E., Bader S.D. Infrared spectra of giant magnetoresistance Fe/Cr/Fe trilayers. *Phys. Rev. B.* 1998; 57(5):2705-4. DOI: 10.1103/ PhysRevB.57.2705

8. Kravets V.G., Bozec D., Matthew J.A.D., Thompson S.M., Menard H., Horn A.B., Kravets A.F. Correlation between the magnetorefractive effect, giant magnetoresistance, and optical properties of Co-Ag granular magnetic films. *Phys. Rev. B*. 2002; 65(5):054415-9. DOI: 10.1103/PhysRevB.65.054415

9. Granovskiy A., Gushhin V., Bykov I., Kozlov A., Kobayashi N., Ohnuma S., Masumoto T., Inoue M. Giant magnetorefractive effect in magnetic granular CoFe-MgF alloys. *Semiconductors/Physics of the Solid State*. 2003; 45(5):911-913.

10. Granovsky A.B., Sukhorukov Yu.P., Gan'shina E.A., Telegin A.V. Magnetorefractive Effect in Magnetoresistive Materials. In: Springer Series in Materials Science. Magnetophotonics. From Theory to Applications. V. 178 / ed. by M. Inoue, M. Levy, A.V. Baryshev. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. P. 107–134.

11. Telegin A.V., Sukhorukov Yu.P., Loshkareva N.N., Mostovshchikova E.V., Bebenin N.G., Gan'shina E.A., Granovsky A.B. Giant magnetotransmission and magnetoreflection in ferromagnetic materials. *J. Magn. Magn. Mater.* 2015; 383:104-109. DOI: 10.1016/j. jmmm.2014.11.080

12. Lobov I.D., Kirilova M.M., Makhnev A.A., Romashev L.N., Ustinov V.V. Parameters of Fe/Cr interfacial electron scattering from infrared magnetoreflection. *Phys. Rev. B*. 2010; 81: 134436-6. DOI: 10.1103/PhysRevB.81.134436

13. Bannikova N.S., Milyaev M.A., Naumova L.I., Proglyado V.V., Krinitsina T.P., Kamenskii I.Y., Ustinov V.V. Giant magnetoresistance of CoFe/Cu superlattices with the $(Ni_{80}Fe_{20})_{60}Cr_{40}$ buffer layer. The Physics of Metals and Metallography. 2015; 116(10):987-992.

14. Yurasov A.N., Telegin A.V., Bannikova N.S., Miliaev M.A., Sukhorukov Yu.P., Features of the magnetorefractive effect in a multilayer metal nanostructure $[CoFe/Cu]_n$. *Fizika tverdogo tela* (*Semiconductors/Physics of the Solid State*). 2018; 60(2):276-282. (in Russ.)

15. Mayevsky V.M. PMM. 59. 1985. P.213. (in Russ.). Маевский В.М. Theory of magnetooptical effects in multilayer systems with an arbitrary orientation of magnetization. *Fizika metallov i materialovedeniye (The Physics of Metals and Metallography)*. 1985; 5(2):213-219. (in Russ.)

16. Yurasov A.N., Telegin A.V., Sukhorukov Yu.P. Model of the magnetorefractive effect in manganites within the effective medium theory. *Physics of the Solid State*. 2016; 58(4):674-677.

Об авторах:

Мокрушина Анастасия Алексеевна, магистрант первого курса кафедры наноэлектроники Физикотехнологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Юрасов Алексей Николаевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры наноэлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА –Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Anastasia A. Mokrushina, Master Student of the Chair of Nanoelectronics, Physics and Technology Institute, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Alexey N. Yurasov, D.Sc. (Physics and Mathematics), Docent, Professor of the Chair of Nanoelectronics, Physics and Technology Institute, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Для цитирования: Мокрушина А.А., Юрасов А.Н. Особенности моделирования магниторефрактивного эффекта в многослойных металлических наноструктурах // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 3. С. 59–68. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-59-68

For citation: Mokrushina A.A., Yurasov A.N. Features of modeling of the magnetorefractive effect in multilayered metal nanostructures. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2019; 7(3):59-68. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-59-68

УДК 681.782.473

DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-69-76

Стенд для исследования позиционно-чувствительного фотоприемника

В.И. Чукита¹, Э.А. Сенокосов¹, В.С. Фещенко^{2,@}

¹Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, Тирасполь MD-3300, Приднестровская Молдавская Республика

²ООО «Производственно-технологический центр «УралАлмазИнвест», Москва 121108, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: feshchenko@mail.ru

В работе рассмотрены позиционно – чувствительные фотоприемники (ПЧФ), которые предназначены для обнаружения источника электромагнитного излучения оптического диапазона и определения координаты облучаемой области в режиме реального времени, а также слежения за движущимися оптическими объектами. Приведены данные о фотоприёмниках на основе фоточувствительных эпитаксиальных слоев CdSe/Слюда, имеющих нетрадиционную схему расположения и коммутации электрических контактов. Выходным сигналом таких ПЧФ является поперечная разность потенциалов, которая возникает между двумя его контактами после засветки одной из областей фотоприемника. Они могут составить альтернативу или конкуренцию существующим фотоэлементам в связи с высокой точностью, быстродействием, простоте изготовления и дешевизне. Однако для широкого применения ФЧП существуют существенные препятствия, в частности, аналоговый тип выходного сигнала, а также трудности «ручной» калибровки вновь изготовленного фотоприёмника, которая занимает длительное время. Нами разработан стенд для исследования позиционно – чувствительных фотоприемников, который позволяет оцифровывать сигнал, получаемый с фотоприёмника, в режиме реального времени, с высокой точностью определять координаты облученной области на фотоприёмнике и исследовать такие его характеристики, как заданное значение темнового тока фотоприемника, световой ток при определенной освещенности, выходное напряжение. На стенде проведены исследования позиционно – чувствительных фотоприемников на основе системы CdS/Слюда и показано, что измеренные характеристики и параметры фотоприёмников совпадают с теоретическими в пределах погрешности. Даны рекомендации по применению стенда.

Ключевые слова: эпитаксиальный слой, позиционно-чувствительный фотоприемник, эквипотенциальная линия тока, микроконтроллер, дельта-сигма аналого-цифровой преобразователь, электронный коммутатор, программируемый усилитель, индикаторное устройство.

The Stand for Research of Positional-Sensitive Photosensor

Vitaly I. Chukita¹, Eduard A. Senokosov¹, Valery S. Feshchenko^{2,@}

¹Shevchenko Pridnestrovian State University, Tiraspol, MD-3300, Pridnestrovian Moldavian Republic ²Production-Technological Center «UralAlmazInvest», Ltd., Moscow 121108, Russia [@]Corresponding author e-mail: feshchenko@mail.ru

The paper considers position-sensitive photodetectors (PSP), which are designed to detect the source of electromagnetic radiation in the optical range and determine the coordinates of the irradiated area in real time, as well as to track moving optical objects. In particular, data are presented on photodetectors based on photosensitive epitaxial CdSe/mica layers with an unconventional layout and switching of electrical contacts. The output signal of such PSP is the transverse potential difference that appears between its two contacts after exposure of one of the areas of the photodetector. These PSPs can be an alternative or competition to existing photocells due to high accuracy, speed, ease of manufacture and low cost. But there are significant obstacles for their wide application. First, it is an analog type of output signal, which prevents its further processing. And, second, it is difficult to calibrate "manually" a newly made photosensor: it takes a long time associated with the accumulation and processing of large amounts of data. The introduction of computer technology and the creation of an information-measuring system allow us to process the output signals of such photodetectors with high accuracy and speed in real time. To solve this problem we have developed a stand for the study of position-sensitive photodetectors, which is presented in this paper. This stand allows digitizing the signal received from the photodetector, in real time, with high accuracy to determine the coordinates of the irradiated area on the photodetector and explore its characteristics such as the specified value of the dark current of the photodetector, light current at a certain illumination, and output voltage. At this stand, position-sensitive photodetectors based on the CdS/mica system were studied. It is shown that the characteristics and parameters of photoreceivers measured on this stand coincide with theoretical ones, within the error limits. Recommendations on the use of the stand are given.

Keywords: epitaxial layer, position-sensitive photodetector, equipotential current line, microcontroller, delta-sigma analog-to-digital converter, electronic switch, programmable amplifier, indicator device.

Введение

Развитие современных систем автоматического управления предъявляет повышенные требования к системе сенсоров, в том числе оптического диапазона [1]. Отсюда вытекает необходимость в разработке новых конструкций сенсорной элементной базы, а также в применении новых материалов при их изготовлении [2]. Изменяются принципы съема и обработки сигналов, например, появляется требование оцифровать сигнал на выходе фотоприемника [2].

Рассматриваемые в настоящей работе позиционно-чувствительные фотоприемники (ПЧФ) предназначены для обнаружения источника электромагнитного излучения опти-

ческого диапазона, определения координаты облучаемой области в режиме реального времени и слежения за движущимися оптическими объектами [3]. Известны данные о фотоприемниках на основе фоточувствительных эпитаксиальных слоев CdSe/слюда, имеющих нетрадиционную схему расположения и коммутации электрических контактов [4, 5]. Выходным сигналом таких ПЧФ является поперечная разность потенциалов, которая возникает между двумя его контактами после засветки одной из областей фотоприемника. Физические основы функционирования фотоприемников такого типа изложены в [4]. Указанные ПЧФ могут составить альтернативу или конкуренцию существующим фотоэлементам в связи с высокой точностью, быстродействием, простотой изготовления и дешевизной. Однако для их широкого применения имеются некоторые проблемы: во-первых, это аналоговый тип выходного сигнала, препятствующий дальнейшей его обработке; во-вторых - трудности «ручной» калибровки вновь изготовленного фотоприемника, которая занимает длительное время, связанное с накоплением и обработкой большого массива данных. Внедрение средств вычислительной техники и создание информационно-измерительной системы позволяет с высокой точностью и скоростью обрабатывать выходные сигналы таких фотоприемников в режиме реального времени. Решение подобных задач обычно осуществляется путем создания разного рода стендов [6, 7], которые позволяют исследовать объект в режиме реального времени.

В статье представлены результаты разработки и испытания стенда, который позволяет оцифровать выходной сигнал, откалибровать ПЧФ, определить его параметры и характеристики, а также использовать для обнаружения, сопровождения и определения координат источника света в режиме реального времени.

Разработка стенда для исследования позиционно-чувствительных фотоприемников

Нами разработан стенд для регистрации сигнала ПЧФ, преобразования его в цифровую форму и передачи на персональный компьютер. С помощью разработанной программы он собирает, обрабатывает и хранит полученные данные, что позволяет исключить субъективную ошибку оператора. Поставленная задача вызвана, в первую очередь, потребностью в высокой скорости и точности результатов измерений.

На рис. 1 приведена структурная схема стенда, который используется для определения координат облученной области фотоприемника и измерения параметров и характеристик исследуемых ПЧФ.

Поставленная задача решается с использованием одноканального низкошумящего 18-битного дельта-сигма аналого-цифрового преобразователя (АЦП) МСР3421¹, работающего со скоростью 3.75 выборок в секунду. Основным его достоинством является высокая точность измерения, обусловленная низким уровнем собственного шума, и встроенный программируемый усилитель входного сигнала. Такие АЦП работают в диапазоне частот до сотен килогерц и обладают линейной передаточной характеристикой и низкой потребляемой мощностью. Взаимодействие АЦП и микроконтроллера осуществляется при помощи двухпроводного последовательного интерфейса I²C. Элементом управления измерительного устройства является микроконтроллер ATmega 32 PU². Его отличитель-

¹Microchip MCP3421 [DATASHEET] 18-Bit Analog-to-Digital Converter with I2C Interface and On-Board Reference. ²Atmel Atmega32A [DATASHEET] Atmel-8159F-8-bit AVR Microcontroller Datasheet Complete-09/2015.



Рис. 1. Структурная схема стенда.

ной особенностью является большой объем внутренней памяти, необходимой для решения поставленной задачи. Контроллер принимает результаты измерений в цифровой форме от внешнего АЦП. Затем обрабатывает их, согласно алгоритму его программы, и передает непосредственно в память персонального компьютера (ПК) для хранения и дальнейшей их обработки. В структурную схему устройства для проверки работоспособности и снижения погрешности измерения введен эталонный образец (ЭО), формирующий при определенных условиях на выходе сигнал с известными высокостабильными параметрами (световой ток). В качестве ЭО брали фоторезистор ФСД-1 [8].

Когда ключ (К) находится в положении 1, происходит проверка работоспособности устройства. В это время ЭО подключен к источнику стабилизированного постоянного напряжения (ИП). В результате с резистора нагрузки R_н1 снимается выходной сигнал, который с помощью АЦП преобразуется в цифровую форму. При переключении К в положение 2 стабилизированное напряжение подается к паре контактов А и С через замкнутые контакты электронного коммутатора. При этом через фотоприемный элемент пропускается входной ток I_{ву}. К другим контактам В и D, расположенным на эквипотенциальной линии тока, электронный коммутатор подключает сопротивление нагрузки R₂, с которого снимается «поперечное» выходное напряжение U_{вр}, возникающее при локальной засветке зондом поверхности приемного элемента ПЧФ. Выходное напряжение U_{вр} соответствует определенной координате (X). В следующий момент времени электронный коммутатор подключает источник постоянного напряжения к контактам В и D, а с контактов А и С снимается полезный сигнал U_{AC}, соответствующий другой координате (Y). Управление электронным коммутатором осуществляется с помощью микроконтроллера по заданной программе. Время переключения электронного коммутатора устанавливается программно и составляет 40 мс, а время релаксации фотоприемного элемента соответствует величине 20 мс. Такой режим работы ПЧФ обеспечивает определение координат Х и У облучаемой поверхности фотоприемного элемента.
Методика измерения и основные экспериментальные результаты

С целью исследования параметров и характеристик ПЧФ использовали эпитаксиальные слои CdSe/слюда в форме диска радиусом R = 9 мм и толщиной d = 40 мкм. Они обладали *n*-типом проводимости, удельная величина которой при 300 К составляла $8.0 \cdot 10^{-9}$ Ом⁻¹×см⁻¹. При освещенности интегральным светом 200 лк кратность фотоответа исследованных слоев CdSe/слюда имела значение ~10⁴.

Зондирование образцов осуществляли с помощью источника излучения (ИИ), представляющего собой твердотельный лазер LD-76005W с длиной волны 670 нм и средней мощностью 3 мВт. Луч лазера направляли перпендикулярно поверхности приемного элемента и фокусировали в пятно радиусом $a \approx 0.5$ мм. Текущее значения измеряемых величин контролировали на жидкокристаллическом символьном индикаторном устройстве BC 1604, построенном на базе встроенного контроллера ST7066 [9]. В режиме реального времени на индикаторном устройстве отображается заданное значение темнового тока фотоприемника, его световой ток при определенной освещенности, выходное напряжение ПЧФ и координаты облученной области.

В соответствии с элементарной теорией токопротекания, развитой на основе решения уравнения Лапласа [9, 10], выходной сигнал напряжения $U_{\rm BD}$ исследуемых ПЧФ зависит от местоположения, радиуса и интенсивности L светового пятна, а также от величины $I_{\rm BX}$ и определяется выражением:

$$U_{BD} = \frac{\delta\sigma}{\sigma} \cdot \frac{a^2}{R^2} \cdot \frac{I_{ex}}{\pi\sigma d} \cdot \frac{8r_{00}^2 \sin 2\Theta}{(1 - r_{00}^4)^2 + 4r_{00}^4 \sin^2 2\Theta},$$
(1)

где $\delta\sigma$ – изменение фотопроводимости при локальной засветке образца в точке К($\vec{r_0}$);

 $r_{00} = r_0 / R$ – безразмерный радиус оптического зондирования;

*r*₀ – модуль радиус-вектора пятна засветки;

а – радиус пятна засветки;

 Θ – угол между вектором \vec{r}_0 и положительным направлением оси X.

Величины *R* и *d* представляют собой радиус и толщину полупроводникового диска, соответственно. Удельная темновая электропроводность фотоприемника обозначается через σ , а ее изменение при локальной засветке в точке К(\vec{r}_0), как уже отмечалось, равно $\delta\sigma$.

С помощью разработанного устройства исследовали зависимость выходного сигнала ПЧФ CdSe/слюда от безразмерного радиуса оптического зондирования светоприемного элемента: $U_{\rm BD} = f(r_{00})$. Сканирование лучом по поверхности фотоэлемента осуществляли в направлении от центра фотоприемного элемента к периферии вдоль диагонали первого квадранта. Интенсивность светового зонда обеспечивала относительную величину фотоответа в области засветки ПЧФ на уровне $\delta\sigma/\sigma \ll 0.025$, соответствующем условию $\delta\sigma/\sigma \ll 1$, необходимому для получения выражения (1). На этом основании выполнялось допущение об отсутствии размытия пятна возбужденных носителей заряда под действием внешнего электрического поля. На рис. 2 (кривая 1) показана экспериментальная зависимость выходного напряжения ПЧФ CdSe/слюда от безразмерного радиуса оптического зондирования фотоэлемента, снятая при температуре 300 К и значении $I_{\rm вх} = 3.0$ мкА и $\theta = \pi/4$. Установлено, что при $r_{00} = 0.77$ и $I_{\rm вх} = 3.0$ мкА максимальное значение выходного напряжения составляет $U_{\rm max} = 6.6$ В.



Рис. 2. Экспериментальная зависимость напряжения $U_{\rm BD} = f(r_{00})$ при $I_{\rm BX} = 3.0$ мкА и $\theta = \pi/4$ (кривая 1) и теоретические зависимости напряжения $U_{\rm BD} = f(r_{00})$ при $I_{\rm BX} = 3.0, 2.0, 1.0$ мкА и $\theta = \pi/4$ (соответственно кривые 2, 3, 4).

Зависимости $U_{\rm BD} = f(r_{00})$, рассчитанные по формуле (1) при значениях $I_{\rm BX} = 3.0, 2.0, 1.0$ мкА и $\theta = \pi/4$, представлены, соответственно, кривыми 2, 3, 4 (рис. 2). Видно, что экспериментальная зависимость $U_{\rm BD} = f(r_{00})$ хорошо коррелирует с теоретическими расчетами, выполненными по формуле (1). Она проходит через максимум при $r_{00} = 0.77$, а экстремум теоретической зависимости соответствует значению $r_{00} = 0.75$, практически совпадающему с максимумом экспериментальной зависимости.

На возрастающем участке экспериментальной зависимости $U_{\rm BD} = f(r_{00})$ при входном токе $I_{\rm BX} = 3$ мкА и $\theta = \pi/4$ определена координатная чувствительность исследуемого образца ПЧФ на основе слоев CdSe/слюда:

$$\eta = \frac{U_{\text{max}}}{\Delta r_{00} \cdot I_{BX} \cdot P} = \frac{6,6}{0,57 \cdot 3 \cdot 3} = 1,3 \frac{\text{B}}{\text{MM} \cdot \text{MKA} \cdot \text{MBT}}$$

где $\Delta r_{00} = r_{\text{max}} - r_{\text{min}} = 0.77 - 0.2 = 0.57$ мм.

Удельная спектральная чувствительность при $r_{00} = 0.75$ и $\theta = \pi/4$ составила:

$$\eta = \frac{U_{\text{max}}}{I_{BX} \cdot P} = \frac{6,6}{3\cdot 3} = 733 \cdot 10^{-3} \frac{\text{B}}{\text{MKA} \cdot \text{MBT}}$$

Заключение

Разработан стенд для преобразования выходного сигнала ПЧФ в цифровую форму и последующей передачи его на персональный компьютер. Он дает возможность в режиме реального времени контролировать фотоэлектрические параметры исследуемых ПЧФ:

- заданное значение темнового тока фотоприемника;

- световой ток при определенной освещенности;
- выходное напряжение ПЧФ;
- координаты облученной области.

Разработанное устройство позволяет автоматически управлять измерительным процессом, определять координаты облучаемой области в режиме реального времени, исследовать параметры и характеристики позиционно-чувствительных фотоприемников. Данный стенд может быть использован для контроля годности изготовленных ПЧФ, их калибровки. Целесообразно рекомендовать подготовку на основе этого стенда лабораторной работы по изучению свойств и характеристик ПЧФ из различных материалов.

Литература:

1. Dorf R.C., Bishop R.H. Modern Control Systems. New Jersey: Prentice Hall, Inc., 2017. 1032 p.

2. Handbook of Optical Sensors / Eds. J.L. Santos, F. Farahi. Boca Raton: CRC Press, 2014. 718 p.

3. Горн Л.С., Хазанов Б.И. Позиционно-чувствительные детекторы. М.: Энергоиздат, 1982. 64 с.

4. Сенокосов Э.А., Чукита В.И., Хамидуллин Р.А., Чебан В.Н., Один И.Н., Чукичев М.В. Экспериментальное и теоретическое исследование характеристик позиционно-чувствительных фотоприемников на основе эпитаксиальных слоев *n*-CdSe/слюда // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51. Вып. 5. С. 689–694. DOI: 10.21883/ FTP.2017.05.44430.8406

5. Senokosov E.A., Chukita V.I., Khamidullin R.A., Cheban V.N., Odin I.N., Chukichev M.V. Position sensitivity characteristics of *n*-CdSe epitaxial layers grown on mica crystals in a quasi-clozed system // Inorg. Mater. 2016. V. 52. \mathbb{N} 8. P. 762–764. DOI: 10.1134/S002016851608015X

6. Битюков В.К., Иванов А.А., Миронов А.В., Михневич Н.Г., Перфильев В.С., Петров В.А. Стенд для исследования характеристик микросхем источников вторичного электропитания с накачкой заряда // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4. № 3. С. 37–52.

7. Бугадян И.Ф., Дубровин В.Ф. Автоматизированный стенд для исследования волновых процессов // Вестник МГТУ МИРЭА. 2014. № 4. С. 223–237.

8. Бараночников М.Л. Приемники и детекторы излучения. Справочник. М.: ДМК Пресс, 2012. 640 с.

9. Сенокосов Э.А., Клюканов А.А., Усатый А.Н., Сергеев С.А., Федоров В.М. Устройство для регистрации слабых световых сигналов: А.с. СССР № 1436796, приоритет от 12.08.86, опубл. 08.07.88.

10. Клюканов А.А., Сенокосов Э.А., Усатый А.Н., Федоров В.М. Устройство для определения координаты светового пятна: А.с. СССР № 1499119, приоритет от 07.01.87, опубл. 07.08.89.

References:

1. Dorf R.C., Bishop R.H. Modern Control Systems. New Jersey: Prentice Hall, Inc., 2017. 1032 p.

2. Handbook of Optical Sensors. Eds. J.L. Santos, F. Farahi. Boca Raton: CRC Press, 2014. 718 p.

3. Gorn L.S., Khazanov B.I. Position-Sensitive Photodetectors. Moscow: Energoizdat Publ., 1982. 64 p. (in Russ.)

4. Senokosov E.A., Chukita V.I., Khamidulin R.A., Cheban V.N., Odin I.I., Chukichev M.V. Experimental and theoretical studies of the characteristics of the position-sensitive photodetectors on the basis of epitaxial layers of the n-CdSe/mica. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* (Semiconductors/Physics of the Solid State). 2017; 51(5):689-694. (in Russ.). DOI: 10.21883/FTP.2017.05.44430.8406

5. Senokosov E.A., Chukita V.I., Khamidullin R.A., Cheban V.N., Odin I.N., Chukichev M.V. Position sensitivity characteristics of n-CdSe epitaxial layers grown on mica crystals in a quasi-clozed system. *Inorg. Mater.* 2016; 52(8):762-764. DOI: 10.1134/S002016851608015X

6. Bityukov V.K., Ivanov A.A., Mironov A.V., Mikhnevich N.G., Perfiliev V.S., Petrov V.A. Stand for studying the characteristics of chips of secondary power sources with charge pumping. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2016; 4(3):37-52. (in Russ.)

7. Bugadyan I.F., Dubrovin V.F. Automated stand for the study of wave processes. *Vestnik MGTU MIREA* (Herald of the MSTU MIREA). 2014; (4):223-237. (in Russ.)

8. Baranochnikov M.L. Receivers and radiation detectors. Handbook. Moscow: DMK Press Publ., 2012. 640 p. (in Russ.)

9. Senokosov E.A., Klukanov A.A., Usatiy A.N., Sergeev S.A., Fedorov V.M. Device for registration weak light signals: USSR Inventor's Certificate no. 1 436 796, 1988. Priority from 08/12/1986. (in Russ.)

10. Klukanov A.A., Senokosov E.A., Usatiy A.N., Fedorov V.M. Device for determining the coordinates of the light spot: USSR Inventor's Certificate no. 1 499 119, 1989. Priority from 01/01/1987. (in Russ.)

Об авторах:

Чукита Випалий Исакович, старший преподаватель кафедры твердотельной электроники и микроэлектроники, Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко (MD -3300, ПМР, Тирасполь, ул. 25 Октября, д. 128).

Сенокосов Эдуард Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой твердотельной электроники и микроэлектроники, Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко (MD-3300, ПМР, Тирасполь, ул. 25 Октября, д. 128).

Фещенко Валерий Сергеевич, доктор технических наук, доцент, начальник научно-производственной лаборатории № 1 ООО «Производственно-технологический центр «УралАлмазИнвест» (121108, Россия, Москва, ул. Ивана Франко, д. 4).

About the authors:

Vitaly I. Chukita, Senior Lecturer of the Chair of Solid-State Electronics and Microelectronics, Shevchenko Pridnestrovian State University (128, 25th of October st., Tiraspol MD-3300, PMR).

Eduard A. Senokosov, D.Sc. (Phys. and Mathem.), Professor, Head of the Chair of Solid-State Electronics and Microelectronics, Shevchenko Pridnestrovian State University (128, 25th of October st., Tiraspol MD-3300, PMR).

Valery S. Feshchenko, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Research and Production Laboratory № 1 of Production-Technological Center «UralAlmazInvest», Ltd. (4, Ivan Franko st., Moscow 121108, Russia).

Для цитирования: Чукита В.И., Сенокосов Э.А., Фещенко В.С. Стенд для исследования позиционночувствительного фотоприемника // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 3. С. 69–76. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-69-76

For citation: Chukita V.I., Senokosov E.A., Feshchenko V.S. The stand for research of positional-sensitive photosensor. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2019; 7(3):69-76. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-69-76

УДК 519.857

DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-77-88

Динамическое программирование как метод сплайн-аппроксимации в САПР линейных сооружений

Д.А. Карпов, В.И. Струченков[®]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия @Автор для переписки, e-mail: str1942@mail.ru

В статье рассматриваются математические модели и алгоритмы решения задач, возникающих при автоматизации проектирования трасс линейных сооружений. Принципиальная особенность этих задач состоит в том, что план и продольный профиль трассы состоят из элементов заданного вида. В зависимости от вида сооружения в проектной практике используются отрезки прямых, дуги окружностей, парабол и клотоид. В любом случае необходимо получить гладкую кривую, состоящую из нужной последовательности элементов заданного вида. На стыках элементы имеют общую касательную, а в наиболее сложном случае и общую кривизну. При этом параметры элементов должны удовлетворять техническим ограничениям, которые формализуются в виде системы неравенств. Такого рода кривые принято называть сплайнами. Важно подчеркнуть, что число элементов искомого сплайна, как правило, неизвестно и определяется в процессе решения задачи. Это обстоятельство существенно усложняет и не позволяет применить для решения методы нелинейного программирования, так как неизвестна ее размерность. Кроме того, искомый сплайн – это экстремаль некоторого функционала. Ранее была решена задача аппроксимации плоской кривой, заданной последовательностью точек, сплайном, состоящим из отрезков парабол. В данной статье рассматривается сплайн, включающий элементы различного вида, в том числе и наиболее сложная задача поиска сплайна, состоящего из последовательности отрезков: прямая+клотоида+окружность+клотоида+прямая и т.д. Этот сплайн в статье называется сплайн с клотоидами. Приводится оригинальная формализация задачи, которая для поиска сплайнов позволяет применять динамическое программирование, а также новый алгоритм.

Ключевые слова: трасса, план и продольный профиль, сплайн, динамическое программирование, целевая функция, ограничения.

Dynamic Programming as a Method of Spline Approximation in the CAD Systems of Linear Constructions

Dmitry A. Karpov, Valery I. Struchenkov[@]

MIREA – *Russian Technological University, Moscow 119454, Russia* [@]Corresponding author e-mail: str1942@mail.ru

Under study is a problem of the line structure routing of roads, railways and other linear constructions. Designing a trace plan and longitudinal profile are considered as non-linear programming tasks. Since the number of elements of the plan and the longitudinal profile is not known, the problem is solved in three stages. First, a search is performed for a polyline consisting of short elements. On the second stage it is used to determine the initial approximation of the desired line, which is optimized at the last stage. The required line consists of a given type elements and it is a spline with a number of features:

- In contrast to the polynomial elements considered in the theory of splines, when designing roads unknown spline is a sequence of elements: straight, clothoid, circle, clothoid, straight and so on.

- In this task, the spline does not have to be a single-valued function.

- The parameters of the elements of the desired spline must satisfy the constraints in the form of inequalities.

These features of the task do not allow the use of non-linear programming methods to solve it. Converting a broken line to a spline is carried out using dynamic programming. For this purpose a special formalization of this task is proposed. A new algorithm of dynamic programming is given. The result is used as an initial approximation to optimize the parameters of the spline using a previously developed non-linear programming program.

Keywords: route, plan view and longitudinal section, spline, dynamic programming, object function, constraint.

Введение

Клинейным сооружениям относятся железные и автомобильные дороги, траншеи Кдля прокладки трубопроводов различного назначения, каналы, водоводы и др. Одна из основных задач в проектировании таких сооружений состоит в поиске положения трассы (оси сооружения) на местности. Трасса – это трехмерная кривая, которая традиционно представляется двумя плоскими кривыми: планом и продольным профилем [1]; план трассы – ее проекция на горизонтальную плоскость, а продольный профиль трассы – линия, являющаяся графиком зависимости координаты Z от длины кривой в плане, отсчитываемой от заданной начальной точки. Продольный профиль получится, если развернуть на плоскость цилиндрическую поверхность, проходящую через трассу, у которой образующая параллельна оси Z, а направляющая совпадает с планом трассы.

В зарубежных САПР, получивших широкое распространение в нашей стране^{1, 2, 3}, и их отечественных аналогах^{4, 5} проектные решения по плану и продольному профилю тем

⁴Topomatic Robur. URL: http:// www.topomatic.ru

¹Bentley Rail Track. [Electronic resource]. URL: http://www.bentley.com/

²CARD/1. [Electronic resource]. URL: http://www.card-1.com/en/home/

³Autodesk. [Electronic resource]. URL: https://www.architect-design.ru/autodesk/autocad/

⁵Credo-Dialog. URL : https://credo-dialogue.ru/

или иным способом задаются проектировщиками и могут быть скорректированы в интерактивном режиме. Компьютер используется для визуализации, вычислений необходимых показателей и выдачи выходной документации.

Альтернативный подход состоит в разработке математических моделей, алгоритмов оптимизации и проектирующих программ, то есть в использовании компьютера для выработки проектных решений, а не только для расчетов применительно к проектным решениям, заданным проектировщиками [1]. Поскольку число искомых элементов плана и профиля неизвестно, еще в 60-х годах прошлого века была предложена многоэтапная схема:

1. Искомая плоская кривая заменяется ломаной линией, состоящей из коротких элементов, параметры которых удовлетворяют соответствующим техническим ограничениям [2]. Компьютер проектирует такую линию, для которой величина принятого критерия оптимальности минимальна, например, объемов земляных работ или строительных затрат.

2. Результат первого этапа преобразуется к требуемому виду, и при этом определяется число элементов и их примерное положение.

3. Результат второго этапа используется как начальное приближение для алгоритма оптимизации параметров элементов сплайна.

Подготовка и анализ исходных данных, контроль процесса и анализ результатов каждого этапа остаются за проектировщиком.

Применительно к проектированию продольного профиля новых железных дорог такая схема была реализована еще в начале 1970-х годов на малопригодной для этой цели ЭВМ БЭСМ-4. Соответствующие программы использовались при проектировании БАМ [1], несмотря на отсутствие возможностей визуализации, организации интерактивного режима работы и т. д. По такой же схеме к 1976 г. была решена и задача проектирования продольного профиля автомобильных дорог [1, 3]. Аналогичный подход реализовали при проектировании каналов оросительной сети и магистральных трубопроводов [1].

Проектирование продольного профиля по заданным вариантам плана трассы независимо от вида сооружения на первом этапе формализовано как задача выпуклого программирования с системой линейных ограничений, имеющей специфическую структуру [1]. Это позволило создать эффективную реализацию методов нелинейного программирования. Решение задачи не требует задания начального приближения, так как проектирующая программа строит его автоматически. Результат первого этапа может использоваться для сравнения вариантов плана трассы, чтобы исключить из рассмотрения заведомо неконкурентные варианты. В последней версии системы компьютер проектирует продольный и поперечные профили земляного полотна железных и автомобильных дорог совместно, с учетом наличия различных слоев грунта, искусственных сооружений и др. [1].

Оптимизация плана трассы новых дорог должна выполняться одновременно с поиском оптимального продольного профиля. Исключение составляют участки напряженного хода, т. е. такие участки, на которых трасса идет предельным уклоном, и поэтому продольный профиль однозначно определяется по плану трассы простыми вычислениями [4]. Для этого случая в 80-е гг. ХХ века была разработана программа оптимизации плана трассы на ЭВМ ЕС. Экспериментально удалось показать, что эффективность совместного проектирования плана и профиля в несколько раз выше, чем при проектировании продольного профиля по заданному варианту плана трассы [4]. Совместное проектирование плана и продольного

профиля – это многоэкстремальная задача нелинейного программирования с нелинейной системой ограничений [4]. Решение таких задач методами нелинейного программирования требует хорошего начального приближения. Гарантировано только достижение окрестности локального минимума. Другими словами, речь может идти об улучшении варианта трассы, заданного проектировщиком. Результат должен быть преобразован в сплайн с клотоидами и подвергнут компьютерной оптимизации (см. выше 3 этап).

Для совместного проектирования плана и профиля разработаны математические модели и алгоритмы [1, 4], но компьютерных программ нет, так как в 1990-х годах работы в данном направлении в России были прекращены и программы оптимизации плана трассы на напряженном ходу утрачены. К настоящему времени о разработке программ аналогичного назначения сведений не имеется, если не считать некоторые алгоритмы, не имеющие математического обоснования, которые иногда ошибочно называются эвристическими. Разработки в области САПР линейных сооружений западные фирмы ведут в рамках принятого разделения функций проектировщика и компьютера, поддерживая устойчивый миф о том, что проектировщик в интерактивном режиме вырабатывает оптимальные решения. Этот миф был опровергнут Ю.С. Карихом еще в 1976 г. специально выполненными экспериментами [3]. Отсутствие публикаций по компьютерной выработке проектных решений на основе математического моделирования сложных проектных задач творческого характера и алгоритмов оптимизации, возможно, связано с высокой стоимостью соответствующих разработок и коммерческими соображениями по использованию их результатов.

Применительно к проектированию плана трассы задача преобразования последовательности точек на плоскости (иначе ломаной, состоящей из коротких элементов) в сплайн с клотоидами возникает при проектировании реконструируемых железных и автомобильных дорог. В последнем случае она известна как задача «восстановления оси», то есть исходная последовательность точек является не результатом первого этапа компьютерного проектирования, а результатом съемки дороги тем или иным способом.

Характерно, что преобразование последовательности точек в сплайн требуется и при компьютерном проектировании других сооружений, когда нет ограничения по непрерывности кривизны, и проектное решение можно искать в виде сплайна, состоящего из отрезков прямых и дуг окружностей. Поэтому алгоритм построения вышеупомянутого сплайна, состоящего из элементов трех видов, находит различные применения.

Ранее была решена задача аппроксимации плоской кривой, заданной последовательностью точек, сплайном, состоящим из отрезков парабол [5].

Цель настоящей статьи состоит в формализации задачи таким образом, чтобы можно было применить динамическое программирование, представить новый алгоритм построения сплайна с клотоидами, исходя из условия наилучшей аппроксимации исходных точек при соблюдении технических ограничений.

1. Постановка задачи и ее формализация

Задана последовательность точек на плоскости, начальная и конечная точки искомого сплайна, начальное и, возможно, конечное направление (рис. 1). Требуется найти последовательность элементов: клотоида, окружность, клотоида, прямая и т. д., которая наилучшим образом в заданном смысле описывает исходные точки и удовлетворяет следующим ограничениям:

– кривизна искомого сплайна во всех точках находится в заданных пределах, иными словами, заданы R_{min} и R_{max} – соответственно, минимальный и максимальный радиусы окружностей, которые могут быть различны для различных элементов. Так как кривизна клотоиды меняется от нуля до кривизны окружности, этого достаточно для выполнения ограничения по кривизне на всем сплайне;

– заданы $L_{\kappa\pi}^{min}$, $L_{o\kappap}^{min}$ и L_{np}^{min} – минимальные длины клотоиды, окружности и прямой, соответственно, а также максимальная длина клотоиды $L_{\kappa\pi}^{max}$;

– дополнительно могут быть заданы минимальный угол поворота, а также интервал допустимых значений скорости изменения кривизны клотоиды. Кривизна клотоиды σ линейно зависит от ее длины L, вычисляемой от точки с нулевой кривизной: $\sigma = kL$, и параметр k должен удовлетворять условию $k_{min} \le k \le k_{max}$. Если при длине клотоиды L радиус кривизны равен R, то получаем ограничение:

$$k_{\min} \le \frac{1}{(LR)} \le k_{\max}.$$
(1)



Рис. 1. Элементы искомого сплайна: *АВ*, *CD*, *EF*, *GH* – клотоиды; *BC*, *FG* – окружности; *DE* – прямая вставка; θ – угол поворота.

В отличие от сплайнов, рассматриваемых в теории [6], в нашей задаче элементы сплайна (клотоиды и окружности) не являются полиномами, и их границы (по оси абсцисс) не заданы, как и число элементов. Искомый сплайн не обязан быть графиком однозначной функции. Поэтому для оценки качества аппроксимации используются отклонения по нормалям. Поскольку число элементов сплайна неизвестно, нельзя применить методы нелинейного программирования. Это обстоятельство, а также многочисленные ограничения – неравенства на параметры сплайна – обусловливают необходимость поиска для оптимальной сплайн-аппроксимации одну из возможных реализаций метода динамического программирования [7].

Ключевое понятие в динамическом программировании – состояние системы [7]. Процесс поиска состоит из нескольких шагов, и на каждом из них система может находиться в разных состояниях. Последовательность шаговых состояний образует траекторию (путь). Понятие «состояние системы» надо формализовать так, чтобы различные пути, приводящие в одно и то же состояние, были сравнимы, то есть множества их возможных продолжений должны совпадать. Тогда в соответствии с принципом оптимальности Р. Беллмана [7] в каждом состоянии можно оставить только один приводящий в него путь, наилучший по целевой функции.

Для формализации задачи выполняем следующие действия:

- исходные точки соединяем прямолинейными отрезками и получаем исходную ломаную линию;

- в каждой исходной точке, кроме начальной и конечной, строим нормаль, то есть прямую, соединяющую эту точку с центром кривизны окружности, проходящей через заданную точку и две смежных с ней (рис. 2); если три точки лежат на одной прямой, то берем нормаль к этой прямой;

- вычисляем и запоминаем ориентацию нормалей, то есть угол γ_i каждой из них с осью ОХ. Расстояние по нормали от исходной точки до точки пересечения со сплайном обозначим u_i . При этом $u_i < 0$, если точка пересечения находится справа (по ходу трассы) от исходной точки, и $u_i > 0$, если слева.

Целевая функция: $\sum_{i=1}^{n} u_i^2 \rightarrow \min$:

- на каждой нормали в обе стороны от исходной точки с координатами x_{i0} , y_{i0} откладываем заданное число *m* дискретов Δ , вычисляем и запоминаем координаты полученных точек разбиения нормалей, используя формулы:

$$x_{ir} = x_{i0} + r \Delta \cos \gamma_i; y_{ir} = y_0 + r \Delta \sin \gamma_i.$$

Точки на каждой *i*-той нормали пронумерованы от исходной точки влево по ходу трассы со знаком плюс (r = 1, 2, ..., m) и вправо – со знаком минус (r = -1, -2, ..., m).



Рис. 2. Разбиение нормалей.

Состояние системы определим, как точку на нормали, которая будет началом очередной *левой* клотоиды (на рис.1 это клотоиды *AB* и *EF*) плюс направление стороны угла поворота, которой принадлежит данная точка. Для возможных направлений сторон угла поворота зададим дискрет φ . От угла касательной $\gamma_i + \pi/2$ в обе стороны отложим равное число дискретов φ . Таким образом, в каждой точке каждой нормали образуется набор направлений. Переход от одного состояния (начало левой клотоиды плюс направление стороны угла поворота) к другому (начало следующей левой клотоиды плюс направление стороны угла поворота) это и есть шаговый переход.

Необходимо знать еще две величины: L_{min} и L_{max} , соответственно, минимальную и максимальную длину кривой от одного состояния системы до другого. На рис. 1 длина кривой записывается как AB+BC+CD+DE. L_{min} можно вычислить как $2L_{\kappa a}^{min} + L_{o\kappa p}^{min} + L_{np}^{min}$ (рис. 1). Значение L_{max} так же, как и дискреты Δ , φ и их количества, при разбивке нормалей и формировании множества состояний системы есть не что иное, как входные параметры. Принятая нами формализация понятия «состояние системы» позволяет при переходе от *j*-ого состояния к (*j*+1)-ому определять вершину угла поворота (ВУ) трассы как точку пересечения соответствующих прямых, а затем радиус окружности и длину клотоид – из условия наилучшей аппроксимации исходных точек в пределах от нормали *j*-ого состояния до нормали (*j*+1)-го состояния при соблюдении всех ограничений, включая ограничение на минимальную длину прямой вставки. Важно, что этот поиск можно выполнять независимо от всех остальных состояний. Таким образом, поиск сплайна с клотоидами сводится к определению координат нужных ВУ.

Вспомогательные задачи

На каждом шаге поиска элементов сплайна нам придется решать несколько задач, а именно: в заданный угол поворота вписать клотоиду, окружность и снова клотоиду (рис. 3). Рассмотрим, как определить радиус кривой R и длину клотоиды L, соблюдая все ограничения.

Начало левой клотоиды (точка A на рис. 1) известно. С достаточной для практики точностью ее расстояние T от ВУ при угле поворота θ (рис. 3) описывается формулой:

$$T = \left(R + \frac{L^2}{(6R)}\right) tg\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{L}{2}$$
(2)

При устройстве клотоиды центр окружности, вписанной в угол, сдвигается по биссектрисе на $\frac{p}{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}$, где p – с достаточной для практики точностью равен $\frac{L^2}{6R}$.

На другой стороне угла расстояние S от BУ до начала следующей левой клотоиды (рис. 1) известно: $S - T = L_{np}$, где L_{np} – длина прямой вставки. Если $L_{np} < L_{np}^{min}$, то соответствующий шаговый переход не допустим, в противном случае нужно искать R и L из условия наилучшей аппроксимации.

Для определения радиуса R и длины клотоиды L имеем одно уравнение (2) с двумя неизвестными. Чтобы уравнение (2) имело решение относительно R при заданном L, необходимо:

$$L < \frac{T}{\left(0.5 + tg\frac{\theta}{2}\right) \times \frac{\sqrt{6}}{3}}$$



Рис. 3. Элементы вписанной кривой: AA_1 и DD_1 – окружность до и после вписывания клотоид CD и C_1D_1 ; OA – радиус.

Если получаем $L < L_{\kappa_1}^{min}$, то такой шаговый переход не допустим. В противном случае корень уравнения (2) *R* получаем по формуле:

$$R = \frac{3(2T-L) + \sqrt{9(2T-L)^2 - 24\left(Ltg\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2}}{12tg\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$
(3)

Заметим, что если R_1 – корень уравнения (2), то $\frac{L^2}{(6R_1)}$ тоже корень этого уравнения, так как произведение корней равно $\frac{L^2}{2}$. Второй корень равен параметру *p*. Он получается, если в (3) взять радикал с минусом, и является посторонним. Если *L* возрастает, то *R* уменьшается. Поэтому при получении по формуле (3) $R < R_{min}$ увеличение *L* смысла не имеет. При получении $R_{min} \le R \le R_{max}$ необходимо проверять выполнение неравенства (1). На практике кривая вписывается в заданный угол при известных *L* и *R*. Нам же предстоит многократно решать задачу поиска допустимых *L* и *R*, при которых сумма квадратов расстояний по нормалям от соответствующих заданных точек до пересечения со сплайном минимальна.

Расчет расстояний требует поиска пересечения нормалей с клотоидой, окружностью и прямой. В двух последних случаях вопрос решается просто. А для поиска пересечения нормали и части клотоиды приходится организовывать итерационный процесс, т. е. следует, заменяя клотоиду двумя хордами, вычислять пересечение нормали с каждой из них и оставлять для дальнейшего только одну хорду, которая пересекается с нормалью, делить ее пополам и т. д., пока длина хорды не достигнет заданного минимального значения. Для вычисления декартовых координат точек клотоид используются степенные ряды и преобразование системы координат.

Поскольку неизвестно, имеет ли целевая функция локальные минимумы, приходится перебирать значения L. Длина клотоиды L в практике принимается кратной 10 м. Начиная с минимального значения $L_{\kappa_n}^{min}$, вычисляем R из (3) и проверяем ограничения по радиусам и параметру клотоиды k.

Если все ограничения выполнены, вычисляем сумму квадратов отклонений по нормалям от исходных точек в пределах рассматриваемого угла, включая прямую вставку

на следующей стороне угла (на рис. 1 от точки A до точки E). Сумму запоминаем, увеличиваем L на 10 м и повторяем расчет. Если дальнейшее увеличение L смысла не имеет, то тогда (или по исчерпании перебора) принимаем L и R равными минимальной сумме квадратов отклонений.

2. Алгоритм построения сплайна

Первый шаг алгоритма. Суммируя длины элементов исходной ломаной, определяем точку съемки, для которой эта сумма больше или равна L_{min} . Все точки соответствующей нормали рассматриваем последовательно как возможные начала левой клотоиды второго элемента (точка *E* на рис. 1). Для каждой из них перебираем направления и строим ВУ как точки пересечения с начальным направлением (рис. 4), и для каждой найденной ВУ наилучшие допустимые значения радиуса окружности и длину переходных кривых находим, как рекомендовано выше.



Рис. 4. Первый шаг алгоритма: *А* – начальное состояние; *Е*,*C*,*D* – варианты состояний после первого шага.

Запоминаем для наилучшего варианта координаты ВУ, радиус, длину клотоид, окружности и прямой вставки, суммарную величину критерия оптимальности, а также предшествующее, в данном случае начальное состояние. Далее переходим к следующей нормали и повторяем описанные действия, пока не дойдем до нормали на расстоянии L_{max} . В результате будут построены все возможные в данной схеме варианты первой ВУ и, соответственно, первой кривой.

Общий шаг алгоритма. Берем первую нормаль, на которой есть точки и для которой удалось построить ВУ. В каждой из них имеется одно или несколько направлений. Каждую такую точку и каждое направление в ней будем рассматривать как начальные (рис. 5). На первом шаге была всего одна начальная точка и направление, а теперь их несколько. Для каждой такой точки и каждого направления выполняем все действия, как на первом шаге. Получаем варианты очередной ВУ и, соответственно, кривой, вписанной в угол. Далее переходим к следующей нормали и повторяем те же действия и т. д. Важно отметить, что на первом шаге могла быть связь только с одним предшествующим состоянием. Для дальнейших шагов таких связей может быть несколько, так как в одно и то же состояние можно прийти разными путями (рис. 5). Поскольку для каждого пути вычисляется критерий оптимальности, то в каждом состоянии из всех приводящих в него путей можно оставить только один и запомнить предыдущее состояние. Заметим, что сравнива-

ются пути достижения рассматриваемого состояния по целевой функции, вычисляемой от начальной точки до текущего состояния. Сравниваемые пути могут содержать разное число кривых (ВУ). Процесс продолжается до тех пор, пока сумма длин элементов исходной ломаной до конечной точки больше, чем L_{min} . Иначе начинается поиск последней кривой (ВУ).



Рис. 5. Общий шаг алгоритма (начальных состояний – много).

Последний шаг алгоритма. Начинаем с нормали, отстоящей от конечной точки на L_{max} . Для всех относящихся к ней состояний (точек и направлений) последовательно строим пересечения с конечным направлением. Если оно не задано, то приходится последовательно рассматривать несколько таких направлений в конечной точке. Для каждого образовавшегося угла решаем, как и ранее, задачу «поиска оптимального значения радиуса окружности и длины клотоид». Отличие в том, что прямая вставка может не требоваться, то есть конечная точка может быть концом правой клотоиды, а не началом левой клотоиды следующего элемента.

Вычисляем суммарное значение критерия оптимальности, оставляем и запоминаем наилучший путь, приводящий в конечное состояние. Переходим к следующей нормали и выполняем те же действия. Процесс заканчивается при достижении последней нормали (на расстоянии L_{min} до конца), для которой выполнялись вычисления до перехода к поиску последней ВУ. Рассмотрев все допустимые варианты последней ВУ, выбираем и запоминаем наилучший по целевой функции.

Восстановление искомого сплайна. Поскольку в каждом из состояний запоминали то состояние, переход из которого дает суммарно (от начальной точки) наименьшее значение целевой функции, то обратным разворотом восстанавливаем ВУ, соответствующие оптимальному варианту, и все параметры вписанных кривых. Можно было бы запоминать и координаты концов клотоид и окружностей для упрощения последующих расчетов.

Заключение

Результат, получаемый по новому алгоритму, не окончательный, так как на втором этапе ставилась цель найти число элементов и построить начальное приближение для оптимизации их параметров с помощью алгоритма нелинейного программирования (третий этап). Результат второго этапа может быть окончательным только при использовании

малых величин дискретов Δ и ϕ при разбиении нормалей, создании веера направлений и использовании большого количества этих дискретов. Но, как показал опыт эксплуатации программы построения параболических сплайнов с помощью динамического программирования, такой подход может потребовать большого времени счета. Программа третьего этапа разработана несколько лет тому назад и показала хорошие результаты как при проектировании плана трассы реконструируемых железных дорог, так и при восстановлении оси автодорог. Отметим, что начальное приближение приходилось рассчитывать путем задания прямых вставок вручную в графическом режиме. Реализация изложенного алгоритма позволит автоматизировать и этот процесс.

Литература:

1. Струченков В.И. Методы оптимизации трасс в САПР линейных сооружений. М: Солон-Пресс, 2015. 271 с.

2. Михалевич В.С., Шор Н.З. Математические основы решения задачи выбора оптимального очертания продольного профиля // Труды Всесоюзн. науч.-исслед. ин-та трансп. стр-ва. Вып. 51. М.: Транспорт, 1964. С. 12–24.

3. Карих Ю.С. Оценка существующих методов проектирования продольного профиля // В сб. трудов ГипродорНИИ. Вып. 17. Повышение экономической эффективности капиталовложений в строительство, ремонт и содержание автомобильных дорог. М.: Издание ГипродорНИИ, 1976. С. 105–112.

4. Шейдвассер Д.М. Оптимизация трассы железных дорог на напряженных ходах // В Сб. научных трудов ВНИИ трансп. стр-ва. Автоматизация проектирования объектов транспортного строительства. М.: Транспорт, 1986. С. 16–29.

5. Струченков В.И. Использование параболических сплайнов в САПР линейных сооружений // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 1. С. 40–51.

6. Альберг Дж., Нильсон Э., Уолш Дж. Теория сплайнов и ее приложения: пер. с англ. М.: Мир, 2012. 319 с.

7. Беллман Р. Динамическое программирование. М.: Изд-во Иностранной литературы, 1960. 402 с.

References:

1. Struchenkov V.I. Methods to optimize the routes in CAD linear structures. Moscow, Solon Press Publ., 2014. 271 p. (in Russ.)

2. Mikhalevich V.S., Shor N.Z. Mathematical foundations for solving the problem of choice optimal outline of the longitudinal profile. *Trudy Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta transportnogo stroitel'stva* (Proceed. of the All-Union Scientific Research Institute of Transport Construction). 1964. Is. 51. Moscow: Transport Publ., 1964. P. 12-24. (in Russ.)

3. Karikh Yu.S. Evaluation of existing longitudinal profile design methods. In the Collection of works of GiprodorNII: Improving the economic efficiency of investment in the construction, repair and maintenance of roads. M.: GiprodorNII Publ., 1976. P. 105-112. (in Russ.)

4. Sheidvasser D.M. Optimization of the route of the railways on tight passages. In the Collection of scientific works of the All-Union Scientific Research Institute of Transport Construction: Automation of the design of transport construction objects. M.: Transport Publ.,

1986. P. 16-29. (in Russ.)

5. Struchenkov V.I. The use of parabolic splinees in CAD of linear structures. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2018; 6(1):40-51. (in Russ.)

6. Alberg J., Nilson E., Walsh J. The theory of splines and its applications. Moscow: Mir Publ., 2012. 312 p. (in Russ.)

7. Bellman R. Dynamic programming. Moscow: Inostrannaya literatura Publ., 1960. 402 p. (in Russ.)

Об авторах:

Карпов Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой общей информатики Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (Россия, 119454, Москва, пр. Вернадского, д. 78).

Струченков Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры общей информатики Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (Россия, 119454, Москва, пр. Вернадского, д. 78).

About the authors:

Dmitry A. Karpov, Ph.D. (Engineering), Head of the Chair of General Informatics, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Valery I. Struchenkov, D.Sc. (Engineering), Professor of the Department of General Informatics of the Institute of Cybernetics of Chair of General Informatics, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Для цитирования: Карпов Д.А., Струченков В.И. Динамическое программирование как метод сплайн-аппроксимации в САПР линейных сооружений // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 3. С. 77–88. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-77-88

For citation: Karpov D.A., Struchenkov V.I. Dynamic Programming as a Method of Spline Approximation in the CAD Systems of Linear Constructions. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2019; 7(3):77-88. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-77-88