

На правах рукописи



СТРОМОВ АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОПУТЕВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ В
БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ, ОСНОВАННОЙ НА ГЕОМЕТРИИ
СИЛОВЫХ ЛИНИЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ПОЛЯ**

Специальность: 05.13.18 – «Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Воронеж 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Воронежский государственный университет»

Научный руководитель: заслуженный деятель науки РФ,
доктор физико-математических наук,
профессор Нечаев Юрий Борисович

Официальные оппоненты: Батаронов Игорь Леонидович,
доктор физико-математических наук,
профессор, Воронежский
государственный технический
университет, кафедра высшей математики
и физико-математического
моделирования, заведующий,

Росляков Александр Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
Поволжский государственный
университет телекоммуникаций и
информатики, кафедра автоматической
электросвязи, заведующий

Ведущая организация: ФГАОУ ВПО «Белгородский
государственный национальный
исследовательский университет»

Защита диссертации состоится 21 января 2015 г. в 15.10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.038.20 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Воронежский государственный университет» по адресу: 394006, г. Воронеж, Университетская пл., 1, ауд. 335.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Воронежский государственный университет» по адресу: Университетская площадь, дом 1, г. Воронеж, 394006 и на сайте Воронежского государственного университета, <http://www.science.vsu.ru/>.

Автореферат разослан «___» ноября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Шабров Сергей Александрович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Увеличение количества применяемых человеком устройств с беспроводным интерфейсом, к которым относятся не только средства связи (смартфоны), но и устройства, объединённые в сети бытового («умный» дом, «интернет вещей») или промышленного и исследовательского (сенсорные сети) назначения, и их миниатюризация ведут к перспективе появления беспроводных сетей, состоящих из очень большого (до десятков тысяч и более) количества узлов. Использование всё более высоких сегментов частотного диапазона, обусловленное необходимостью увеличения скорости передачи информации, привело к уменьшению дальности непосредственной передачи «точка – точка», и, как следствие, к разработке сетей ячеистой топологии. Важной задачей в таких сетях является маршрутизация данных. Вопросам исследования беспроводных сетей посвящено большое количество литературы, в частности труды: М. Шварца, В. М. Вишневого, В. И. Комашинского, J. D. Gibson, Yan Zhang. Актуальной задачей является исследование ячеистых сетей с большим количеством узлов, так как в таких сетях возникает ряд проблем, связанных с масштабированием существующих протоколов, прежде всего алгоритмов маршрутизации. Особую важность эта задача приобретает в связи с разработкой перспективных сенсорных сетей, узлы которых являются беспроводными микроэлектромеханических системами («умная пыль»). В связи с высокой загруженностью частотного диапазона, а особенно тех его участков, которые выделены в общественное нелицензируемое пользование, актуальным является моделирование сетей адаптивно реагирующих на наличие источников непреднамеренных помех. Перспективным алгоритмом маршрутизации для больших беспроводных сетей является метод маршрутизации на основе силовых линий потенциального поля, предложенный S. Toumpis, L. Tassiulas и M. Kalantari, M. Shayman. Этот метод характеризует использование «макроскопических» характеристик беспроводной сети (информационного потока, плотности производства / информации, плотности размещения узлов) в отличие от традиционно используемых «микроскопических» (скорость передачи информации от узла к узлу, точные координаты каждого узла). Однако данный подход не учитывал влияние на сеть источников помех и современные способы адаптации сетей. Таким образом, актуальна задача совершенствования и моделирования перспективных алгоритмов маршрутизации для беспроводных адаптивных сетей, поддерживающих работу с большим количеством узлов.

Целью работы является разработка и моделирование основанного на геометрии силовых линий потенциального поля алгоритма маршрутизации, учитывающего влияние источника помех, для реализации энергоэффективных протоколов маршрутизации в беспроводных ячеистых сетях с большим количеством узлов, в том числе с адаптивными антеннами.

Для достижения этой цели в работе решены следующие **задачи**:

- определение, в рамках исследуемой математической модели, физической интерпретации потенциала плотности информационного потока, представляющего направления и интенсивности передачи информации в сети, и размерности коэффициента информопроводности характеризующего возможности сети как среды передачи информации;

- разработка модели маршрутизации с учётом влияния источников помехи на сеть с адаптивным изменением скорости передачи информации между узлами в зависимости от отношения сигнал / шум в канале, в том числе и в случае, когда узлы сети оборудованы антеннами с адаптивно изменяемой диаграммой направленности, компенсирующей влияние источника помех;

- доказательство корректности краевой задачей математической физики, моделирующей маршрутизацию в сети, узлы которой оборудованы антеннами с простейшей кардиоидоподобной адаптивно изменяемой диаграммой направленности, компенсирующей влияние источника помех;

- обоснование выбора численных методов для моделирования маршрутизации в адаптивных и неадаптивных сетях на основе сравнительного анализа;

- разработка комплекса программ для численного моделирования маршрутизации в неадаптивных сетях и в сетях рассмотренными методами адаптации.

Объект исследования – беспроводная информационная или сенсорная сеть, состоящая из большого количества узлов; предмет исследования – алгоритмы маршрутизации в такой сети.

Методы исследования. При проведении работы использовались методы: математической физики, теории информации, математического моделирования, вычислительной математики. Также использовался вычисленный эксперимент с применением численных методов решения граничных задач для дифференциальных уравнений в частных производных.

Основные положения, выносимые на защиту:

– энергетическая трактовка потенциала плотности информационного потока, методика оценки коэффициента информопроводности на основе параметров узлов сети и источника помех;

– математическая модель маршрутизации на основе геометрии силовых линий потенциального поля при наличии источников помех в беспроводных сетях с адаптивным изменением скорости передачи информации между узлами в зависимости от отношения сигнал / шум в канале, в том числе и в случае, когда узлы сети оборудованы антеннами с адаптивно изменяемой кардиоидоподобной диаграммой направленности, компенсирующей влияние источника помех;

– доказательство корректности краевой задачей математической физики с постоянными коэффициентами, моделирующей маршрутизацию в сети, узлы которой оборудованы антеннами с простейшей кардиоидоподобной адаптивно изменяемой диаграммой направленности, компенсирующей влияние источника помех;

– сравнительный анализ точности и вычислительной эффективности численных методов: метода комплексных полиномов, комплексного метода граничных элементов и метода конечных элементов, на известных моделях физических процессов, подобных по математическому описанию разработанной модели;

– комплекс программ, реализующий предложенный метод, и результаты численных экспериментов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– метод оценки коэффициента информопроводности для сети, адаптивно реагирующей на воздействие источника помехи, разработан впервые;

– предложена и исследована основанная на геометрии силовых линий потенциального поля усовершенствованная математическая модель маршрутизации в беспроводных сетях, позволяющая:

- строить маршруты с учетом наличия в сети одного или нескольких источников помех;

- учитывать адаптивное изменение скорости передачи информации в зависимости от отношения сигнал / шум;

- моделировать сети, узлы которых оборудованы антеннами с адаптивно изменяемой диаграммой направленности в зависимости от расположения и мощности источников помехи;

– впервые доказана корректность постановки соответствующей модели граничной задачи для рассматриваемого уравнения в частных производных второго порядка с сильным вырождением;

– сравнительный анализ по эффективности метода комплексных полиномов и комплексного метода граничных элементов друг с другом и с конечно-элементными методами на основе известных точных и приближенных решений задач математической физики выполнен впервые.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

– предложенные алгоритмы предназначены для разработки энергоэффективных протоколы маршрутизации перспективных беспроводных ячеистых сетей;

- результаты моделирования позволяют уже на начальном этапе проектирования оценить энергетический выигрыш от применения в сети методов адаптации по скорости передачи информации и антенн с адаптивно изменяемой диаграммой направленности;
- даны практические рекомендации по использованию метода комплексных полиномов и комплексного метода граничных элементов;
- разработан комплекс программ для моделирования маршрутизации в адаптивных и неадаптивных беспроводных сетях.

Область исследования. Область исследования и содержание диссертации соответствует формуле специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (физико-математические науки), область исследований соответствует: п. 1 «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений»; п. 3 «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий»; п. 4. «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»; п. 5 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на ряде конференций, в том числе: Воронежская зимняя математическая школа «Современные методы теории функций и смежные проблемы», Воронеж, 2011; XVII, XIX и XX МНТК «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC 2011, 2013, 2014), Воронеж; 21st and 22nd Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2011, 2012), Sevastopol, Ukraine; 5-я МНТК «Сенсорная электроника и микросистемные технологии» (СЭМСТ-5), Украина, Одесса, 2012, доклад отмечен дипломом конференции. Полученные в диссертации результаты частично использовались при выполнении НИР «Разработка и применение новых методов обработки, передачи и защиты информации в информационно-коммуникационных системах» (государственный регистрационный № 012202.04120808) в Воронежском государственном университете и грантов РФФИ (проекты 08-02-13555-офи-ц, 09-07-97577-р-центр-а, 11-07-00600-а, 14-07-00713). Отдельные результаты внедрены в учебный процесс в Воронежском государственном университете, что подтверждается актом о внедрении.

Публикации. По теме диссертации опубликованы шесть статей в научных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, двадцать шесть статей в сборниках трудов научных конференций.

Личный вклад автора. Автор лично разработал предложенную модификацию модели маршрутизации в беспроводной ячеистой сети, основанной на геометрии силовых линий потенциального поля, в присутствии источника помех и метод оценки коэффициента электропроводности. Автор участвовал в обосновании корректности задачи, описывающей исследуемую модель. Автор лично реализовал программное обеспечение и выполнил расчеты, результаты которых использованы в диссертации. Автор наравне с другими соавторами участвовал в написании работ, опубликованных по теме диссертации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Объем основной части диссертации – 160 страниц машинописного текста, в том числе 26 графиков и рисунков, 8 таблиц. Библиография насчитывает 141 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы, отражена научная новизна и ее практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту, дается краткое содержание глав диссертации.

В первой главе «Маршрутизация в беспроводных сетях» представлены описание, принципы построения, особенности и основные сферы применения беспроводных сетей с ячеистой топологией. Приведено определение маршрутизации в беспроводных ячеистых

сетях, указаны отличия от маршрутизации в проводных сетях. Дана классификация протоколов маршрутизации в беспроводных ячеистых сетях. Также описаны основные подходы к моделированию процесса маршрутизации в таких сетях.

Во второй главе «Математическая модель маршрутизации в сверхбольшой сети» сформулирована математическая модель, описывающая маршрутизацию в беспроводной сети через «макроскопические» характеристики передачи информации, характеризующие сеть не дискретными параметрами, описывающими состояние каждого узла в отдельности, а интегральными функциями, непрерывными в области развертывания сети:

- \mathbf{W} ($\text{бит}/(\text{м} \cdot \text{с})$) векторная функция плотности информационного потока, направление которой совпадает с направлением передачи информации, а модуль равен скорости, с которой информационный поток пересекает бесконечно малый отрезок, расположенный в указанной точке перпендикулярно к направлению функции \mathbf{W} ;

- ρ ($\text{бит}/\text{м}^2$) – функция плотности производства / потребления информации, принимающая положительные или отрицательные значения в зависимости от того, производится или потребляется пользовательская информация в данной точке области, занимаемой сетью.

Требование доставки всей переданной информации получателю имеет вид $\nabla \cdot \mathbf{W} = \rho$. Оптимизация функции \mathbf{W} по критерию: нагрузка на маршрут обратно пропорциональна его длине, позволяет распределить нагрузку по передаче информации на большее количество узлов, что увеличит время работы сети, но не создаст значимых задержек в доставке информации. Математически это выражается в потенциальности функции \mathbf{W} : $\nabla \times \mathbf{W} = 0$. Тогда можно перейти к рассмотрению функции U – потенциала информационного потока. Для однозначности этой функции требуется, чтобы в области расположения получателя информации (сток) $U = 0$. Физический смысл функции U заключается в том, что потенциал информационного потока численно равен количеству энергии, необходимому для доставки сообщения получателю с учетом всех требуемых ретрансляций. Введём также коэффициент K , определяющий свойства сети как среды распространения сигнала. По аналогии с коэффициентами теплопроводности и диффузии, K можно назвать коэффициентом информопродности, он имеет размерность $\text{бит}/\text{Дж}$ и численно равен объему информации, пересекающему отрезок единичной длины, перпендикулярный направлению потока информации \mathbf{W} за единицу времени, если градиент потенциала равен 1. Тогда математическая модель маршрутизации примет следующий вид:

$$\nabla \cdot (-K \nabla U) = \rho . \quad (1)$$

Далее приведена оценка вида коэффициента K для сети, находящейся под воздействием источника помех и использующей только адаптацию по скорости передачи данных или дополнительно применяющей простейшие адаптивные антенны, режетирующие в диаграмме направленности направление на помеху. Для удобства будем рассматривать задачу в полярных координатах, причём источник помехи находится в начале координат. Тогда уравнение (1) примет вид

$$\frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(rK \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(K \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right) \right) = \rho . \quad (2)$$

Зададим отношения сигнал/шум SNR_1 , SNR_2 , причём $SNR_1 < SNR_2$. SNR_1 характеризует нижнюю границу работоспособности системы: если отношение сигнал/шум будет ниже этого значения, передача информации станет невозможной, SNR_2 является верхней границей, по достижении которой скорость передачи информации между узлами и, соответственно, пропускная способность сети больше не будет увеличиваться. Тогда в области, занимаемой сетью, можно выделить три зоны, характеризующие влияние помехи на вид коэффициента K и разделяющиеся по степени удаленности от источника помех. Во внутреннем круге

радиуса r_1 , в центре которого расположен источник помех, передача информации невозможна из-за интенсивности помехи и коэффициент $K = 0$. В кольце, ограниченном концентрическими кругами радиусов $r_2 > r_1$ влияние помехи уменьшается, а пропускная способность сети растёт. Во внешности круга r_2 сеть не испытывает воздействия помехи, коэффициент K в этой области можно считать постоянным. Оценка коэффициент K для случая узлов, оборудованных изотропными антеннами и адаптивно изменяющими скорость передачи информации с учётом изменения отношения сигнал / шум:

$$K(r) = \begin{cases} 0 & , r \leq r_1 \\ \frac{w}{\sqrt{d} P_T} \log_2 \left(\frac{P_T h_R r^4 d^2}{P_{TN} h_{TN}} + 1 \right) & , r_1 < r \leq r_2 , \\ \frac{w}{\sqrt{d} P_T} \log_2 (SNR_2 + 1) & , r > r_2 \end{cases}$$

где $r_1 = \sqrt[4]{\frac{SNR_1 P_{TN} h_{TN}}{P_T h_R d^2}}$, $r_2 = \sqrt[4]{\frac{SNR_2 P_{TN} h_{TN}}{P_T h_R d^2}}$. Здесь w (Γu) – полоса частот сигнала;

d ($узлов/м^2$) – плотность размещения узлов; P_T и P_{TN} (Bm) – мощность излучения передающей антенны источника полезного сигнала и источника помехи соответственно; h_R и h_{TN} – высоты расположения антенн приёмника и источника помехи соответственно. Рассмотрен также случай, когда узлы сети оборудованы простейшими адаптивными антеннами. Антенна узла представляет собой два вертикальных вибратора с расстоянием между ними $\lambda/4$, где λ – длина волны используемой несущей. Тогда при соответствующем выборе разности фаз на вибраторах можно получить диаграмму направленности антенны от практически круговой в горизонтальной плоскости при подаче синфазного сигнала на оба вибратора, до кардиоидоподобной, в случае разности фаз равной $\pi/2$. При воздействии на сеть помехи узлы самостоятельно ориентируют свои антенны «вырезом» кардиоидоподобной диаграммы в направлении помехи и регулируют глубину «выреза», в зависимости от мощности помехи (и, соответственно, от расстояния между узлом и источником помехи). Как и в предыдущем случае, скорость передачи данных зависит от отношения сигнал / шум, причем в разных направлениях это отношение будет различным, так как оно будет определяться взаимной диаграммой направленности передающей и приемной антенн. Для сохранения линейности уравнения (2) аппроксимируем взаимные диаграммы направленности таких антенн эллипсами, а в предельных случаях – отрезком и кругом, как показано на рисунке 1. Тогда уравнение (2) примет вид

$$\frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(r K_r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(K_\varphi \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right) \right) = \rho . \quad (3)$$

При условии, что в направлении, перпендикулярном радиус-вектору, отношение сигнал/шум должно всегда быть не менее SNR_2 , что обеспечит в этом направлении максимально возможную скорость передачи информации, коэффициенты K_r и K_φ определяются формулами (4), в которых ψ_a – разность фаз на антенне. Полезно рассмотреть дополнительное семейство маршрутов которое, не являясь оптимальным в описанном выше смысле, в то же время близко к оптимальному. Это позволит получить дополнительный набор маршрутов, на который можно перейти при истощении энергетических ресурсов основного набора. Для получения этого дополнительного набора модифицируем уравнение (3) введением дополнительного слагаемого (5). Далее будем рассматривать простейший случай $L_r = const$.

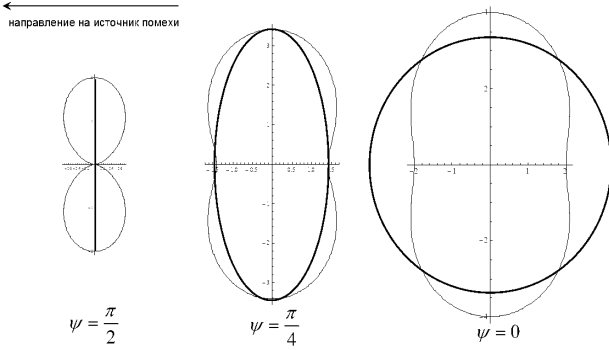


Рис. 1. Взаимная диаграмма направленности передающей и принимающей антенн узлов, ориентированных в направлении источника помехи, и их аппроксимации

$$K_r = \begin{cases} 0 & , r \leq r_1 \\ \frac{w}{\sqrt{d} P_T} \log_2 \left(\frac{P_r h_R (r - r_1)^4 d^2 \cos(\psi_a)}{2 P_{TN} h_{TN} \cos\left(\frac{\psi_a + \pi}{4}\right)} + 1 \right) & , r_1 < r \leq r_2 \\ \frac{w}{\sqrt{d} P_T} \log_2 (SNR_2 + 1) & , r > r_2 \end{cases} \quad (4)$$

$$K_\varphi = \begin{cases} 0 & , r \leq r_1 \\ \frac{w}{\sqrt{d} P_T} \log_2 (SNR_2 + 1) & , r > r_1 \end{cases}$$

$$\frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(r \left(K_r(r) \frac{\partial U}{\partial r} + L_r U \right) \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(K_\varphi \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right) \right) = \rho \quad (5)$$

Так как при $r < r_1$ передача информации и работа сети невозможна, то информационный поток должен огибать круг радиуса r_1 . Соответственно, граничное условие при $r = r_1$ будет иметь вид

$$\left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{r=r_1} = 0 \quad (6)$$

На внешней границе круга $r = r_2$ информационный поток будет переходить в область, не подверженную влиянию источника помех. Без ограничения общности можно считать, что на границе выполняется условие

$$U|_{r=r_2} = g(r, \varphi) \quad (7)$$

Заметим, что из (4) следует, что $K_r|_{r=r_1} = K_r|_{r=r_1} = 0$, уравнение (5) вырожденное и требуются дополнительные исследования корректности постановки задачи (5 – 7).

Также во второй главе приведён метод расчета коэффициента информопроводности в случае, когда внутри области, занимаемой сетью, находятся несколько источников помех, а каждый узел компенсирует воздействие наиболее мощной помехи, и рассмотрены способы

построения реальных маршрутов по полученным в результате моделирования силовым линиям потенциального поля.

В третьей главе «Априорные оценки, существование и единственность решения задачи» сформулированы и доказаны априорные оценки, теоремы существования и единственности для задачи (5 – 7).

Выполним взаимно-однозначную замену переменных $x = r - r_1$, $y = tg(\varphi/2)$ (при $-\pi < \varphi \leq \pi$). Тогда задача будет рассматриваться в полосе $0 \leq x \leq r_2 - r_1$, а уравнение (5) примет вид

$$K_r \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + K_\varphi \left(\frac{1+y^2}{2(x+r_1)} \right)^2 \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \left(\frac{K_r}{x+r_1} + K_r' + L_r \right) \frac{\partial U}{\partial x} + K_\varphi \frac{y(1+y^2)}{2(x+r_1)^2} \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{L_r}{x+r_1} U = \rho \quad (8)$$

Обозначим $\alpha(x) = \sqrt{K_r(x)}$, $D_x^\tau = (i)^\tau \frac{\partial^\tau}{\partial x^\tau}$, $D_{\alpha,x} = \frac{1}{i} \sqrt{\alpha(x)} \frac{\partial}{\partial x} \sqrt{\alpha(x)}$, $D_y = \frac{1}{i} \frac{\partial}{\partial y}$.

Тогда (8) можно записать в виде

$$\begin{aligned} & -D_{\alpha,x}^2 U - K_\varphi \left(\frac{1+y^2}{2(x+r_1)} \right)^2 D_y^2 U + \left(\frac{\alpha^2}{x+r_1} + L_r \right) \frac{\partial U}{\partial x} + \\ & + iK_\varphi \frac{y(1+y^2)}{2(x+r_1)^2} D_y U + \left(\frac{L_r}{x+r_1} - \frac{\alpha\alpha'}{2} - \left(\frac{\alpha'}{2} \right)^2 \right) U = \rho. \end{aligned} \quad (9)$$

Введём дифференциальный оператор $M_2(x, y, D_{\alpha,x}, D_y) = -D_{\alpha,x}^2 - K_\varphi \left(\frac{1+y^2}{2(x+r_1)} \right)^2 D_y^2 +$
 $+ iK_\varphi \frac{y(1+y^2)}{2(x+r_1)^2} D_y + \frac{L_r}{x+r_1} - \frac{\alpha\alpha'}{2} - \left(\frac{\alpha'}{2} \right)^2$ и обозначим $b(x) = \frac{\alpha^2}{x+r_1} + L_r$.

Тогда (9) примет вид $M_2(x, y, D_{\alpha,x}, D_y)U(x, y) + b(x) \frac{\partial U}{\partial x} = \rho(x, y)$, причём

$$\alpha(x) = A \sqrt{\log_2(B \cdot x^4 + 1)}, \text{ где } A = \sqrt{\frac{w}{\sqrt{d} P_T}}, \text{ а } B = \frac{P_T h_R d^2 \cos(\psi_a)}{2 P_{TN} h_{TN} \cos\left(\frac{\psi_a}{2} + \frac{\pi}{4}\right)}, \text{ и, соответственно}$$

функция $\alpha(x)$ достаточно гладкая и удовлетворяет условию $\alpha(0) = \alpha'(0) = 0$, $\alpha(x) > 0$ при $x > 0$, $|\alpha(x)| \leq c < \infty$ при всех $x \in [0, +\infty)$. Заметим, что

$$\text{Re}(\bar{b} L_2(\xi, \eta)) = \left(\frac{\alpha^2}{x+r_1} + L_r \right) \left(-\xi^2 - K_\varphi \left(\frac{1+y^2}{2(x+r_1)} \right)^2 \eta^2 + \frac{L_r}{x+r_1} - \frac{\alpha\alpha'}{2} - \left(\frac{\alpha'}{2} \right)^2 \right). \text{ При постоянном}$$

$L_r < 0$, существует такое $c > 0$, что $\text{Re}(\bar{b} \cdot L_2(\xi, \eta)) \geq c(1 + |\xi| + |\eta|)^2$.

Рассмотрим оператор $A(x, y, D_{\alpha,x}, D_y, \partial_x) = L_2(x, y, D_{\alpha,x}, D_y) - b(x, y) \partial_x$, где

$$L_2(x, y, D_{\alpha,x}, D_y) = \sum_{|r|+j \leq 2} a_{rj}(x, y) D_{\alpha,x}^r D_y^j, \partial_x = \frac{\partial}{\partial x}, D_{\alpha,x} = i \sqrt{\alpha(x)} \partial_x \sqrt{\alpha(x)}, D_y^\tau = (i)^{|\tau|} \partial_y^\tau. \text{ Функция}$$

$\alpha(x)$ достаточно гладкая при $x \in [0, d]$, $\alpha(x) > 0$ при $x > 0$, $\alpha(0) = \alpha'(0) = 0$. Коэффициенты $a_{rj}(x, y)$, $b(x, y)$ – комплекснозначные, достаточно гладкие функции в $\overline{R_d^2}$. Будем далее рассматривать уравнение

$$A(x, y, D_{\alpha,x}, D_y, \partial_x)U(x, y) = F(x, y), \quad (10)$$

с граничными условиями

$$v(x, y)|_{x=0} = G(y), \quad (11)$$

$$v(x, y)|_{x=d} = 0. \quad (12)$$

С помощью замен переменных показано, что задача (5 – 7) является частным случаем задачи (10 – 12). Выполнены следующие условия:

Условие 1. При любых $(x, y) \in R_d^2$, $(\xi, \eta) \in R^2$ справедлива оценка $\operatorname{Re} \bar{b}(0, y) L_2(x, y, \xi, \eta) \geq c(1 + |\xi| + |\eta|)^2$ с константой $c > 0$ не зависящей от x, y, ξ, η .

Условие 2. При любых $(x, y) \in R_d^2$ выполняется равенство $\operatorname{Im}(\bar{b}(x, y) a_{0,2}(x, y)) = 0$.

Условие 3. Для некоторого $s \geq 2$ функция $\alpha(x)$ принадлежит $C^{s-1}[0; d]$; коэффициенты оператора $A(x, y, D_{\alpha, x}, D_y, \partial_x)$ принадлежат $C^s(R_d^2)$, причём существует такая постоянная $c > 0$, что $|D_y^{\tau'} \partial_x^{j'} a_{\bar{g}}(x, y)| + |D_y^{\tau'} \partial_x^{j'} b(x, y)| \leq c$ при любых $(x, y) \in R_d^2$, $|\tau| + j \leq 2$, $|\tau'| + j' \leq s$.

Условие 4. При всех $x \in [0; d]$ существуют пределы $\lim_{|y| \rightarrow \infty} a_{\bar{g}}(x, y) = a_{\bar{g}}(x)$, $|\tau| + j \leq 2$, $\lim_{|y| \rightarrow \infty} b(x, y) = b(x)$.

Рассмотрим также операторы A_∞ , L_2^∞ , получаемые из операторов A , L_2 с помощью предельного перехода в коэффициентах при $|y| \rightarrow \infty$: $L_2^\infty(x, D_{\alpha, x}, D_y) = L_2(x, \infty, D_{\alpha, x}, D_y)$, $A_\infty(x, D_{\alpha, x}, D_y, \partial_x) = L_2^\infty(x, D_{\alpha, x}, D_y) + b(x) \partial_x$ и уравнения

$$A_\infty(x, D_{\alpha, x}, D_y, \partial_x) U(x, y) = F(x, y), \quad (13)$$

$$A_\infty(+0, D_{\alpha, x}, D_y, \partial_x) U(x, y) = F(x, y), \quad (14)$$

Условие 5. При любых $(\xi, \eta) \in R^2$ справедлива оценка $\operatorname{Re} \bar{b}(0) L_2^\infty(0, \xi, \eta) \geq c(1 + |\xi| + |\eta|)^2$ с постоянной $c > 0$ не зависящей от ξ, η .

Условие 6. Для целого s , определённого в условии 3, коэффициенты операторов $A(x, y, D_{\alpha, x}, D_y, \partial_x)$, $A_\infty(x, D_{\alpha, x}, D_y, \partial_x)$ удовлетворяют условиям

$$\lim_{|y| \rightarrow \infty} \sup \left(\max_{0 \leq x \leq d} |D_{\alpha, x}^{j'} D_y^{\tau'} \partial_x^{l'} (a_{\bar{g}}(x, y) - a_{\bar{g}}(x))| + \max_{0 \leq x \leq d} |D_{\alpha, x}^{j'} D_y^{\tau'} \partial_x^{l'} (b(x, y) - b(x))| \right) = 0, \quad |\tau'| + j' + l' \leq s - 2, \\ |\tau| + j \leq 2.$$

Корректность задачи (10 – 12) исследована в следующих пространствах.

Определение 1. Пространство $H_{s, \alpha}(R_d^2)$ состоит из всех функций $u(x, y)$, $x \in [0, d]$, $y \in R^1$, для которых конечна норма

$$\|v\|_{s, \alpha} = \left\| F_\alpha^{-1} F_{\xi \rightarrow y}^{-1} \left[(1 + |\xi| + |\eta|)^s F_{y \rightarrow \xi} F_\alpha [u(x, y)] \right] \right\|_{L_2(R_d^2)}.$$

Здесь $F_{y \rightarrow \xi}(F_{\xi \rightarrow y}^{-1})$ – прямое (обратное) преобразование Фурье. Преобразование F_α переводит оператор дифференцирования $D_{\alpha, x}$ в оператор умножения на двойственную переменную η . На функциях $u(x) \in C_0^\infty([0, +\infty))$ оно может быть записано в виде

$$F_\alpha [u(x)](\eta) = \int_0^\infty u(x) \exp \left(i \eta \int_x^d \frac{dz}{\alpha(z)} \right) dx, \quad \text{где } d > 0 \text{ – некоторое число. } F_\alpha^{-1} \text{ – преобразование,}$$

обратное к F_α . Это преобразование можно записать в виде

$$F_\alpha^{-1}[w(\eta)](x) = \frac{1}{\sqrt{\alpha(x)}} F_{x \rightarrow \tau}^{-1}[w(\eta)]_{\tau=\varphi(x)}, \text{ где } \tau = \varphi(x) = \int_x^d \frac{dz}{\alpha(z)}.$$

Определение 2. Пространство $H_{s,\alpha,2}(R_d^2)$, $s \geq 0$, состоит из всех функций $u(x, y) \in H_{s,\alpha}(R_+^2)$, для которых конечна норма

$$\|u\|_{s,\alpha,2} = \left\{ \sum_{j=0}^{[s/2]} \left\| F_\alpha^{-1} F_{\xi \rightarrow y}^{-1} \left[(1 + |\xi| + |\eta|)^{s-2j} F_{y \rightarrow \xi} F_\alpha \left[\frac{\partial^j u(x, y)}{\partial x^j} \right] \right] \right\|_{L_z(R_d^2)}^2 \right\}^{1/2}.$$

Здесь $[s/2]$ – целая часть числа $s/2$.

Определение 3. Пространство $H_s(R^1)$ ($s \in R^1$) состоит из всех функций $g(y)$, для которых конечна норма $\langle\langle g \rangle\rangle_s = \left\| F_{\xi \rightarrow y}^{-1} [(1 + |\xi|)^s F_{y \rightarrow \xi} g(y)] \right\|_{L_z(R^1)}$.

Установлены следующие теоремы.

Теорема 1. Пусть $s \geq 2$ – целое число, $F(x, y) \in H_{s-2,\alpha,2}(R_d^2)$, $G(y) \in H_{s-1}(R^1)$. Если выполнены условия 2, 4, 5, то существует единственное решение $U(x, y)$ задачи (14), (11), (12), принадлежащее пространству $H_{s,\alpha,2}(R_d^2)$, для которого справедлива оценка

$$\|U\|_{s,\alpha,2} \leq c \left(\|F\|_{s-2,\alpha,2} + \langle\langle G \rangle\rangle_{s-1} \right), \quad (15)$$

Если кроме того выполнено условие 3, то задача (13), (11), (12) также имеет единственное решение $U(x, y) \in H_{s,\alpha,2}(R_d^2)$, для которого справедлива оценка (15).

Теорема 2. Пусть $s \geq 2$ – целое число, выполнены условия 1 – 6. Тогда для задачи (10 – 12) существует правый (левый) регуляризатор R , то есть оператор R определённый $H_{s-2,\alpha,2}(R_d^2) \times H_{s-1}(R^1)$, действующий в пространство $H_{s,\alpha,2}(R_d^2)$, такой, что функция $U(x, y) = R(F, G)$ удовлетворяет условиям $A(x, y, D_{\alpha,x}, D_y, \partial_x)U(x, y) = F(x, y) + T^0(F, G)$, $U(x, y)|_{x=0} = G(y) + T^1(F, G)$, $U(x, y)|_{x=d} = 0$. При этом оператор $T = \{T^0, T^1\}$ – вполне непрерывный оператор в $H_{s-2,\alpha,2}(R_d^2) \times H_{s-1}(R^1)$.

Из теорем 1 и 2 вытекает, что задача (10 – 12), а значит и задача (5 – 7) является корректно поставленной задачей, так как решение этой задачи существует, единственно и непрерывно зависит от краевых данных.

В четвертой главе «Численное моделирование» описаны численные методы, используемые для реализации рассматриваемой модели и приведены результаты численных экспериментов. Для случая постоянного коэффициента информопроводности K целесообразно использовать методы граничных элементов. Если источники и потребители информации расположены на границе области занимаемой сетью, то задача (1) может быть сведена к уравнению Лапласа. Рассмотрены два метода: метод комплексных полиномов (МКП) и комплексный метод граничных элементов (КМГЭ). Проведено сравнение точности этих методов в зависимости от степени дискретизации границы и, соответственно, объёма вычислений, на задачах с известными решениями. Анализ результатов сравнения показал, что МКП следует применять для выпуклых областей и областей, входящие углы которых близки к развернутым; во всех остальных случаях следует отдать предпочтение КМГЭ. В случае, если коэффициент информопроводности K представляет собой функцию, изменяющуюся в области, занимаемой сетью, целесообразно использовать метод конечных элементов (МКЭ). Приведён вывод слабой формулировки задачи (5 – 7), необходимый для её решения МКЭ.

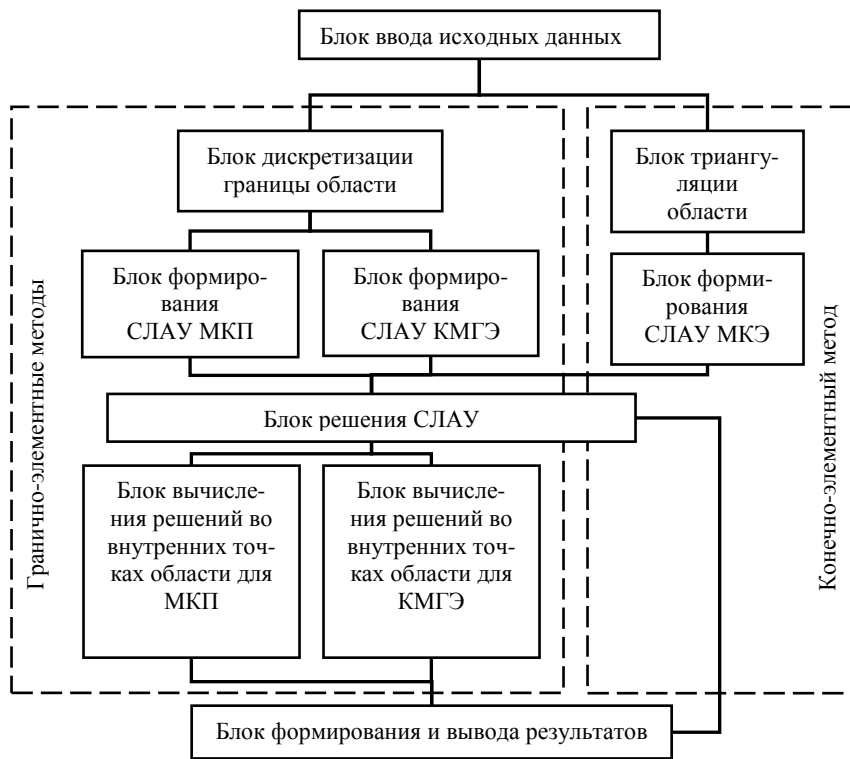


Рис. 2. Структура комплекса программ для проведения вычислительных экспериментов

Приведено описание разработанного комплекса программ для проведения вычислительных экспериментов с использованием комплексных гранично-элементных методов (МКП и КМГЭ) и МКЭ. Структура комплекса приведена на рисунке 2.

Также в четвёртой главе приведён пример численного расчета функции информационного потока в сети. Рассмотрена сеть, занимающая круглую область и функционирующая как без воздействия помехи, так и под воздействием источника помех, расположенного в центре области. Узлы сети и источник помех имеют следующие параметры: мощность передатчика на антенне узла $P_T = 0,001 \text{ Вт}$, высота подвеса антенны узла $h_R = 0,1 \text{ м}$, плотность расположения узлов $d = 1 \text{ узлов/м}^2$, ширина полосы используемого радиоканала $w = 20000 \text{ Гц}$, мощность источника помехи, расположенного в начале полярных координат $P_{TN} = 1000 \text{ Вт}$, высота подвеса его антенны $h_{RN} = 20 \text{ м}$. Источник и получатель информации расположены в точках с координатами $(-600,0)$ и $(600,0)$ соответственно, при пороговых значениях отношений сигнал / шум $SNR_1 = -10 \text{ дБ}$, $SNR_2 = 30 \text{ дБ}$, $r_1 = 79,527 \text{ м}$ и $r_2 = 795,271 \text{ м}$. Результаты моделирования приведены на рисунке 3.

Кроме того, приведены результаты численного эксперимента, в случае наличия внутри области, занимаемой сетью двух источников помех различной мощности.

Результаты моделирования показывают, что применение простейших адаптивных антенн позволяет снизить энергозатраты на функционирование сети и повысить интенсивность передачи информации вблизи источника помех.

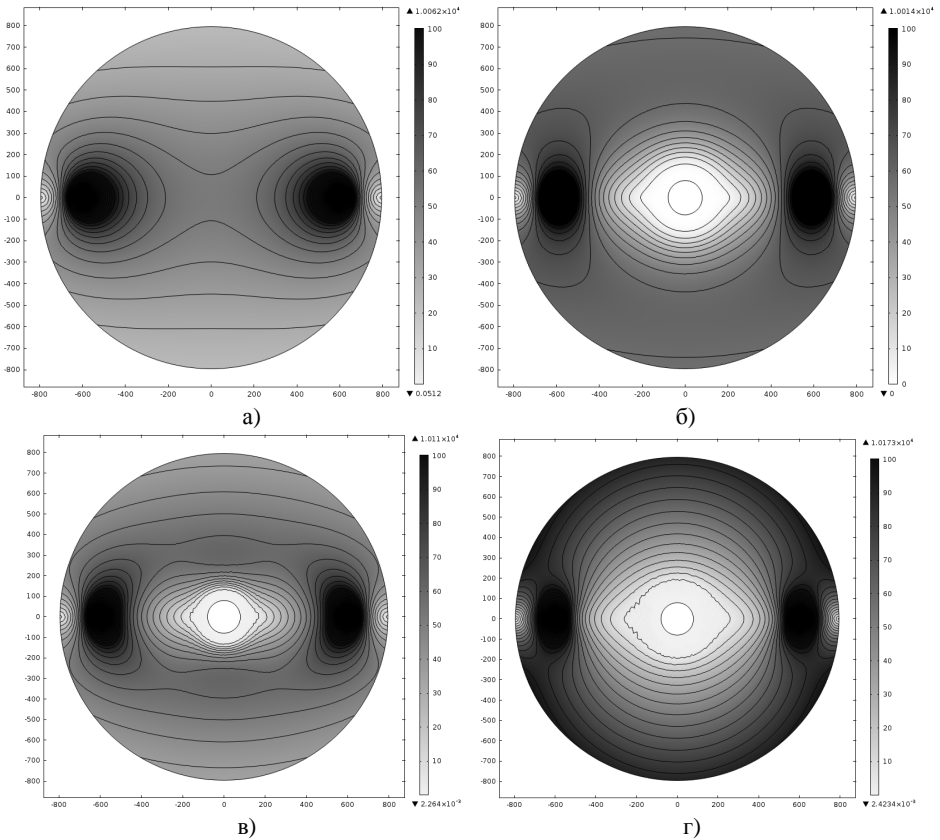


Рис. 3. Интенсивности нагрузки на маршруты $|W|$ для сети:

- а) без воздействия помехи;
- б) с воздействием помехи и изотропными д. н. антенн узлов;
- в) с воздействием помехи и анизотропными д. н. антенн узлов;
- г) с воздействием помехи, анизотропными д. н. антенн узлов и $L_r = -5 \cdot 10^4$

В заключении обобщаются основные научные и практические результаты, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты диссертационной работы, полученные в ходе теоретического анализа и моделирования следующие.

1. Разработан метод оценки коэффициента информопроводности на основе характеристик сети, её узлов и источника помехи.

2. Разработана математическая модель маршрутизации, основанной на геометрии силовых линий потенциального поля в беспроводной адаптивной сети при наличии источников помех для двух видов адаптации беспроводной сети к наличию источника помех: изменение скорости передачи информации в зависимости от отношения сигнал / шум в канале при использовании приёмопередатчиками антенн с изотропной диаграммой направленности, и применение антенн, адаптивно режектирующих сигнал помехи с использованием аналогичного метода адаптации по скорости передачи информации.

3. Доказано, что математическая модель, описывающая маршрутизацию в сети, узлы которой оборудованы антеннами с анизотропной диаграммой направленности, является, в случае постоянных коэффициентов, корректно поставленной задачей математической физики.

4. Проведён сравнительный анализ по эффективности метода комплексных полиномов и комплексного метода граничных элементов, даны рекомендации по использованию методов.

5. Разработан комплекс программ для численной реализации предложенной модели, позволяющий рассчитывать векторное поле информационного потока и производить оценку энергоэффективности полученной схемы маршрутизации.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

Статьи в научных изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК:

1. Aleynikov S.M. Comparison of complex methods for numerical solutions of boundary problems of the Laplace equation by efficiency / S.M. Aleynikov, A.V. Stromov // *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2004. – Vol. 28. – P. 615-622.

2. Нечаев Ю.Б. Моделирование беспроводной мобильной адаптивной сети с использованием протоколов маршрутизации AODV и DSDV / Ю.Б. Нечаев, А.В. Стромов, А.А. Епифанцев // *Телекоммуникации: наука и технологии*, 2009. – № 7. – С. 21-25.

3. Нечаев Ю.Б. Маршрутизация в беспроводной сенсорной сети на основе геометрии силовых линий электростатического поля / Ю.Б. Нечаев, А.Д. Баев, А.В. Стромов // *Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии*, 2010. – № 2. – С. 43-45.

4. Стромов А.В. Моделирование маршрутизации в беспроводной ячеистой сети, использующей простейшие адаптивные антенны / А.В. Стромов, Ю.Б. Нечаев, А.Д. Баев // *Теория и техника радиосвязи*, 2013. – Вып. 4. – С. 57-63.

5. Стромов А.В. Многопутевая маршрутизация в беспроводных сетях при наличии помехового воздействия на основе силовых линий потенциального поля / А.В. Стромов, Ю.Б. Нечаев, А.Д. Баев // *Радиотехника*, 2013. – № 12. – С. 136-142.

6. Стромов А.В. Моделирование маршрутизации в беспроводной ячеистой сети с адаптацией к воздействию нескольких источников помех / А.В. Стромов, Ю.Б. Нечаев, А.Д. Баев // *Теория и техника радиосвязи*, 2014. – Вып. 4. – С. 46-52.

Статьи в материалах и сборниках трудов научных конференций:

7. Стромов А.В. Решение задачи кручения стержней комплексным методом граничных элементов / А.В. Стромов, С.М. Алейников // *Труды 4-й Международной конференции молодых ученых и студентов Актуальные проблемы современной науки. Естественные науки. Ч. 1-3: Математика. Механика. Машиностроение.* – Самара: Изд-во СамГТУ, 2003. – С. 112-115.

8. Aleynikov S.M. Efficiency of complex methods for numerical solutions of some problems of continuum mechanics / S.M. Aleynikov, A.V. Stromov // *Proceedings of the extended abstracts 9-th International Conference on Numerical Methods in Continuum Mechanics, Zilina, Slovak Republic 9-12-th September*, 2003. – P.19-20.

9. Алейников С.М. Комплексные численные методы решения граничных задач для уравнения Лапласа / С.М. Алейников, А.В. Стромов // *Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов / Тез. докл. XX Межд. конф.* – Санкт-Петербург, 24 - 26 сентября, 2003 г. – С. 12-14.

10. Нечаев Ю.Б. Способ моделирования и оптимизации сверхбольших сенсорных сетей / Ю.Б. Нечаев, А.Д. Баев А.В. Стромов // *Материалы X Международной научно-методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии»*, Воронеж, 2010 г. – Воронеж: изд. ВГУ, 2010. – Т.2. – С. 66-67.

11. Нечаев Ю.Б. Математическая модель сверхбольшей сенсорной сети на основе дифференциального уравнения в частных производных второго порядка / Ю.Б. Нечаев, А.В. Стромов, А.Д. Баев // *Материалы XVI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC – 2010)*, Воронеж, 2010 г. – Т. 2. – с. 1112-1116.

12. Нечаев Ю.Б. Определение удельного коэффициента прохождения информации сверхбольшей сенсорной сети / Ю.Б. Нечаев, А.В. Стромов, А.А. Епифанцев, Т.В. Левицкая //

Информационные технологии в связи, вычислительной технике и энергетике: сборник трудов международной научной конференции. Ч. 1 – Воронеж: МИКТ, 2010. – С. 77–82.

13. Nechaev Yu.B., Wireless mesh network throughput vs. node transmitter power / Yu.B. Nechaev, A.V. Stromov, A.A. Epifancev // 20th Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2010). 13-17 September, Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2010. – Vol. 1 – P. 435 – 436.

14. Нечаев Ю.Б. Моделирование маршрутизации в беспроводной сверхбольшой сенсорной сети при наличии внешнего источника помех / Ю.Б. Нечаев, А.Д. Баев, А.В. Стромов // Физика и технические приложения волновых процессов: материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2010. – С. 31.

15. Нечаев Ю.Б. Оценка зависимости пропускной способности беспроводной ячеистой сенсорной сети от связанности узлов сети / Ю.Б. Нечаев, А.В. Стромов, А.А. Епифанцев, Т.В. Левицкая // Физика и технические приложения волновых процессов: материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2010. – С. 33.

16. Стромов А.В. Некоторые аспекты применения и моделирования сверхбольших сенсорных сетей. // Междунар. научно-практическая конф. «Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии»: сборник материалов. – Ч. 3. Естественные, математические и технические науки. – Воронеж: Воронежский институт МВД, 2010. – С. 166-170.

17. Нечаев Ю.Б. Модель маршрутизации в сверхбольшой беспроводной сенсорной сети с групповой реакцией узлов на помеховое воздействие / Ю.Б. Нечаев, А.Д. Баев, А.В. Стромов // Новые информационные технологии и системы: труды IX Международной научно-технической конференции (г. Пенза, 9–10 ноября 2010 г.): в 2 ч. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2010. – Ч. 1. – С. 181-186.

18. Баев А.Д. Об одном методе математического моделирования адаптивных сверхбольших сенсорных сетей. / А.Д. Баев, Ю.Б. Нечаев, А.В. Стромов // Современные методы теории функций и смежные проблемы: материалы воронежской зимней математической школы. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2011. – С. 33-34.

19. Нечаев Ю.Б. Энергетическая трактовка функции потенциала в математической модели сверхбольшой беспроводной сенсорной сети / Ю.Б. Нечаев, А.Д. Баев, А.В. Стромов // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XI Международной научно-методической конференции, Воронеж, 10–11 февраля 2011 г.: в 3 т. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр ВГУ, 2011. – Т.2. – С. 120-123.

20. Нечаев Ю.Б. Моделирование сверхбольшой сенсорной сети с адаптивной реакцией на источник помех / Ю.Б. Нечаев, А.В. Стромов, А.Д. Баев // Материалы XVII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC – 2011), Воронеж, 2011 г.– Т.2. – С. 1032-1039.

21. Нечаев Ю.Б. Маршрутизация в беспроводных мобильных ячеистых сетях с привязкой к местоположению узлов, учитывающая известные источники помех / Ю.Б. Нечаев, А.В. Стромов, А.Д. Баев // X Междунар. научно-техническая конф. «Физика и технические приложения волновых процессов»: материалы. – Самара: ООО «Книга», 2011. – С. 339.

22. Nechaev Yu.B. Routing in Wireless Networks With Creating Disjoint Multipath Topology on the Basis of the Force Lines of Potential Field / Yu.B. Nechaev, A.D. Baiev, A.V. Stromov // 21st Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2011). 12-16 September, Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2011. – Vol. 1. – P. 509-510.

23. Баев А.Д. Модель сверхбольшой беспроводной сенсорной сети при наличии единственного источника помех. / А.Д. Баев, А.В. Стромов // Современные проблемы прикладной математики, теории управления и математического моделирования. Материалы IV Международной научной конференции, Воронеж, 12-17 сентября 2011 г. – Воронеж, 2011. – С. 20-23.

24. Баев А.Д. Существование и единственность решения моделирующего уравнения сверхбольшой беспроводной сенсорной сети под влиянием помехи. / А.Д. Баев, Ю.Б. Нечаев, А.В. Стромов // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики.

Сборник трудов Международной конференции. Воронеж, 26-28 сентября 2011 г. – Воронеж, 2011. – С. 55-58.

25. Нечаев Ю.Б. Оценка максимальной пропускной способности одноранговой одночастотной беспроводной ячеистой сети / Ю.Б. Нечаев, А.В. Стромов // Компьютерные науки и технологии: сборник трудов Второй Международной научно-технической конференции. 3 – 5 октября 2011, г. Белгород. – Белгород: ООО «ГиК», 2011. – С. 492-496.

26. Стромов А.В. Маршрутизация в сенсорных сетях для «умной пыли» с учетом влияния источника помех / А.В. Стромов, Ю.Б. Нечаев, А.Д. Баев // 5-та Міжнародна науково-технічна конференція «Сенсорна електроніка та мікросистемні технології» (СЕМСТ-5) Україна, Одеса, 4–8 червня 2012 р.: тези доповідей. – Одеса: Астропринт, 2012. – С. 131.

27. . Stromov A.V. Adaptation Simulation of the Wireless Sensor Network With Routing Based On the Geometry of Force Lines of Potential Field In the Presence of Interference Source / A.V. Stromov, A.D. Baev, Yu.B. Nechaev // 22nd Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2012). 10-14 September, Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2012. – Vol. 1. – P. 326 – 327.

28. Стромов А.В. Маршрутизация в беспроводных сетях на основе геометрии силовых линий потенциального поля: проблема построения конкретных маршрутов // Прикладная математика, управление и информатика: сборник трудов Междунар. молодеж. конф., Белгород, 3-5 октября 2012 г.: в 2 т. – Белгород: ИД «Белгород», 2012. – Т. 1. – С. 285-288.

29. Стромов А.В. Моделирование маршрутизации в сверхбольшой беспроводной сети с адаптивным изменением скорости передачи данных / А.В. Стромов, Ю.Б. Нечаев, А.Д. Баев // Материалы XIX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC – 2013), Воронеж, 2013 г.– Т.1. – с. 532-538.

30. Нечаев Ю.Б. Моделирование многопутевой маршрутизации в беспроводной сети, узлы которой оборудованы адаптивными антеннами / Ю.Б. Нечаев, А.Д. Баев, А.В. Стромов // Сборник докладов XX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC – 2014), Воронеж, 2014 г.– Т.2. – С. 864-871.

31. Стромов А.В. Моделирование работы беспроводной ячеистой сети с адаптивными антеннами / А.В. Стромов // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо’2014). Севастополь, 7–13 сентября 2014 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2014. – Т. 1. – С. 358-359.

32. Нечаев Ю.Б. Маршрутизация в адаптивной беспроводной сети под воздействием нескольких источников помех / Ю.Б. Нечаев, А.В. Стромов // Физика и технические приложения волновых процессов: Тезисы докладов XII Международной научно-технической конференции: Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы» – Самара: «Самарское книжное издательство», 2014. – С. 41-43.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

33. Стромов А.В., Алейников С.М. Программа решения граничной задачи для уравнения Лапласа методом комплексных полиномов / Отраслевой фонд алгоритмов и программ. Свид. о регистр. №1758. Гос. регистр. №502001100465, 15 января 2002.

34. Стромов А.В., Алейников С.М. Программа решения граничной задачи для уравнения Лапласа методом комплексных граничных элементов / Отраслевой фонд алгоритмов и программ. Свид. о регистр. №1759. Гос. регистр. №502001100466, 15 января 2002.