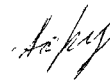


05.13.01

A 941

КОНТРОЛЬНЫЙ
ЭКЗАМПЛЯР

На правах рукописи



АФАНАСЬЕВА Ксения Евгеньевна

**АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНОГО ОЦЕНИВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ТРАФИКА ПРЕДПРИЯТИЯ СВЯЗИ**

05.13.01 – „Системный анализ, управление и обработка информации
(промышленность)“

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2008

Работа выполнена на кафедре «Прикладная математика» Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор Ширяев Владимир Иванович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Казаринов Лев Сергеевич,
кандидат технических наук,
доцент Хаютин Михаил Израилевич.

Ведущая организация – Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва.

Защита состоится 12 ноября 2008 г., в 15 часов, на заседании диссертационного совета Д212.298.03 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан “__” _____ 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук,
профессор



А.Г. Щипицын

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Развитие систем связи, в том числе сотовых систем подвижной связи, сопровождается их планированием. Один из важнейших параметров – это емкость системы сотовой связи, определяемая числом абонентов, которых она может обслужить, и значительная часть усилий при планировании и проектировании направлена именно на обеспечение достаточно высокой емкости. Поэтому предприятию связи требуется прогнозировать трафик для принятия управленческих решений по разработке мероприятий в части проектирования ресурсов радиосети, обеспечения коммутационной ёмкости, достаточной для обслуживания прогнозируемого числа абонентов.

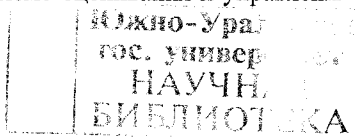
Впервые проблему, связанную с перегрузкой телефонных линий рассмотрел А.К. Эрланг, вопросам массового обслуживания в телефонии посвящены также работы многих ученых, например, отечественных: Г.П. Башарина, Б.В. Гнеденко, В.А. Ивницкого, Л.А. Овчарова, А.Я. Хинчина, зарубежных: Дж.Р. Джексона, Т.Л. Саати.

Для построения прогноза трафика на перспективу от 1 года и более предлагается моделировать трафик через изменение числа абонентов, а также использовать информацию об изменении числа абонентов других предприятий и в других регионах, которые рассматриваются как аналогичные объекты.

Изменение числа абонентов, развитие инноваций происходит по логистическим кривым, поэтому динамика их поведения во всех регионах будет схожа, но вследствие различий в условиях функционирования, развитие в одних регионах происходит интенсивнее, чем в других. Исследованию процессов, подчиняющихся логистическому уравнению, посвящены работы отечественных ученых А.Д. Базыкина, А.П. Михайлова, Р.М. Нижегородцева, В.И. Новосельцева, М.Я. Постава, Н.П. Резниковой, А.А. Самарского и зарубежных ученых Ф. Басса, В. Вольтерра, Ф. Докнера, Т. Мальтуса, Н. Мида, Д. Талакдара, П.Ф. Ферхюльста.

Поведение большого числа пользователей, которые формируют трафик предприятия связи и создают нагрузку сети можно отнести к трудноформализуемым процессам. Для трудноформализуемых процессов математические модели которых либо неизвестны, либо известны с точностью до отдельных параметров, которые могут изменяться в неизвестные моменты времени, необходима разработка эффективных алгоритмов оценивания и прогнозирования. Такие задачи характерны как для предприятий, так и для навигации, управления автономными объектами, сопровождения целей и многих других.

Систематическая постановка задач оценивания впервые дана в работах А.Н. Колмогорова, Н. Винера. Дальнейшее развитие она получила в исследованиях Р.Е. Калмана и Р. Бьюси, что привело к широкому использованию вероятностного подхода к задачам оценивания в работах отечественных ученых В.С. Жабреева, А.А. Красовского, Л.С. Казаринова, О.В. Логиновского, А.Н. Ширяева и зарубежных ученых Я. Бар-Шалом, А. Брайсона, Д.Г. Лайниотиса, Л. Льюнга, П. Эйкхоффа, П.Е. Эльясберга. Проблема оценивания и управления в



условиях неопределенности посвящены также работы Г.А. Тимофеевой, И.Я. Каца, Н.Н. Красовского, С.И. Кумкова, В.М. Кунцевича, А.Б. Куржанского, В.С. Пацко, Ф.Л. Черноусько, В.И. Ширяева, А.Ф. Шорикова и других.

Вопросам прогнозирования посвящены работы С.А. Айвазяна, В.Н. Афанасьева, Р.В. Бочарова, М.М. Голанского, А.А. Грешилова, Г.А. Ивахненко, Л.С. Казаринова, А.С. Манделя, В.Н. Цыгичко.

Вопросы обнаружения изменений свойств временных рядов и динамических систем рассмотрены в работах отечественных ученых Е.А. Гребенюк, Ю.П. Грипина, И.В. Никифорова, А.Н. Ширяева и зарубежных ученых А.С. Вилски, А. Бенвениста, М. Бассвиль, Т. Лая, Т. Оскипера, Е.С. Пейджа.

Традиционная телефония рассматривает трафик с точки зрения проектирования, задания размеров и подготовки к работе телефонной сети. Для того чтобы гарантировать удовлетворительное качество обслуживания, разрабатывались и использовались методы, основанные на построении очередей. Прогнозирование изменения трафика на длительный период является актуальной задачей для планирования развития ресурсов предприятия связи и расширения зоны радиопокрытия.

Объектом исследования является изменение трафика и числа абонентов предприятия связи.

Предметом исследования являются модели, алгоритмы прогнозирования и оценивания, алгоритмы обнаружения разладок при наличии неполных и неточных данных о числе абонентов.

Цель и задачи работы. Разработать алгоритмы адаптивного оценивания и прогнозирования трафика предприятия связи на перспективу от 1 года и более.

Из цели вытекают следующие задачи:

- построения математической модели изменения трафика и числа абонентов предприятия связи;
- разработки метода прогнозирования трафика и числа абонентов по информации об аналогичных объектах;
- разработки адаптивных алгоритмов оценивания числа абонентов при наличии статистического описания возмущений и ошибок измерений и при его отсутствии на основе информации об аналогичных объектах;
- разработки на основе полученных модели и алгоритмов программного обеспечения для прогнозирования трафика и числа абонентов в качестве системы поддержки принятия решений для планирования сетей предприятий связи.

Методы исследования. Теоретические исследования основывались на применении методов математического моделирования, теории адаптивной фильтрации, теории фильтрации Р. Калмана, теории гарантированного оценивания, теории обнаружения изменения свойств динамических систем, методах прогнозирования.

Научная новизна.

1. Установлена возможность представления процессов изменения трафика, числа абонентов, инноваций и других в виде суммы логистических функций с запаздыванием по времени, в результате которого обеспечивается необходимая точность аппроксимации.

2. Для трудноформализуемых процессов предлагается метод прогнозирования с использованием информации об аналогичных объектах. При этом предполагается, что процессы в рассматриваемой системе будут близки в течение какого-то времени процессам в других системах. Разработан алгоритм поиска ближайших аналогов, по траекториям которых строятся прогнозы для интересующего объекта. При использовании траекторий ближайших регионов-аналогов для прогнозирования числа абонентов сотовой связи устанавливается аналогичное поведение событий на интервалах времени до 8–11 месяцев.

3. Разработаны алгоритмы адаптивного оценивания с использованием информации о ближайших аналогичных объектах на основе параллельной работы фильтров для случая, когда известны вероятностные характеристики возмущающих факторов и для случая, когда такая информация априори отсутствует и не имеет стохастической природы.

Практическая ценность и внедрение. Ценность предлагаемых алгоритмов для предприятия сотовой связи заключается в построении прогнозов трафика, числа абонентов и их корректировке при существенном изменении темпов роста числа абонентов по сравнению с ранее существовавшими закономерностями, а также при изменении других факторов, влияющих на трафик.

Создано программное обеспечение, реализующее предложенные методы и алгоритмы. Программный продукт предназначен для специалистов, занимающихся планированием и прогнозированием на предприятиях связи, на основе использования данных о трафике и числе абонентов предприятия, а также числе абонентов в других регионах. Предложенная в работе модель, алгоритмы оценивания состояния, метод прогнозирования по траекториям ближайших регионов-аналогов и их программная реализация были использованы в Межрегиональном филиале сотовой связи ОАО “Уралсвязьинформ”, о чем свидетельствуют акт внедрения результатов НИР и акт об использовании результатов диссертационной работы. С помощью модели и алгоритмов проводился анализ и прогнозирование трафика предприятия и числа абонентов связи в некоторых регионах РФ, определение потенциальной емкости числа абонентов в регионе.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на 34-й Региональной молодежной школе-конференции «Проблемы теоретической и прикладной математики» (Екатеринбург, 2003); Международной конференции “Математическое моделирование социальной и экономической динамики” (Москва, РГСУ, 2004); 5-й Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» (Москва, ИПУ РАН, 2006); XI Всероссийском научно-практическом семинаре «Информационные и телекоммуникационные технологии в региональном, муниципальном и корпоративном управлении» (Челябинск, ЮУрГУ, 2007); Международной научно-практической конференции “Управление инновациями” (Москва, ИПУ РАН, 2007).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 работы, в том числе 3 статьи из перечня ведущих научных журналов, рекомендованных ВАК РФ “Проблемы управления” (2007 г.), “Проблемы прогнозирования” (2007 г.), “Мехатроника, автоматизация, управление” (2008 г.)

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (184 наименования), двух приложений. Основной текст диссертации изложен на 156 страницах и содержит 61 рисунок и 15 таблиц.

Положения, выносимые на защиту.

1. Модель трафика предприятия связи в виде суммы логистических функций.
2. Метод прогнозирования трафика и числа абонентов на основе информации об аналогичных объектах.
3. Алгоритмы адаптивного оценивания по информации об аналогичных объектах при вероятностной природе возмущающих факторов и при неизвестных априори их характеристиках.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулирована цель и задачи работы, отражена научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе приводится анализ состояния основных задач, рассматриваемых в диссертации. Анализируются различные модели для описания изменения числа абонентов, в том числе существующие модели, применяемые в сфере телекоммуникационных услуг, с целью выбора наилучшей.

Для уточнения текущего значения трафика, числа абонентов, при существенном изменении темпов роста числа абонентов по сравнению с ранее существовавшими закономерностями, например, в случае выхода на рынок нового предприятия-конкурента, а также при изменении других факторов, влияющих на трафик, например, снижение средней стоимости минуты, предлагается разработать алгоритм адаптивного оценивания числа абонентов. В случае стохастической природы возмущений и ошибок наблюдений рассматривается многомодельный метод (А. Вилски, Д.Г. Лайниотис), идея которого используется при построении алгоритма оценивания. В методе предполагаются заданными m возможных моделей:

$$x_{i,k+1} = A_{i,k}x_{i,k} + \xi_{i,k} + c_{i,k}, \quad k = 0, 1, \dots, n-1, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

описания объекта, где номер индекса $i = l$, $l \in \{1, 2, \dots, m\}$ истинной модели объекта неизвестен. Известна последовательность наблюдений y_{k+1} , $k = 0, 1, \dots, n-1$ об объекте, которая подчиняется уравнению наблюдений:

$$y_{k+1} = G_{l,k+1}x_{l,k+1} + \eta_{l,k+1} + h_{l,k+1}, \quad k = 0, 1, \dots, n-1.$$

Здесь $A_{i,k}$, $G_{l,k+1}$ – заданные матрицы, $c_{i,k}$, $h_{l,k+1}$ – заданные функции, $\xi_{i,k}$ и $\eta_{l,k+1}$ – возмущения и помехи – независимые гауссовские случайные векторы с известными математическими ожиданиями и матрицами ковариаций. Начальное состояние $x_{i,0}$ – гауссовский вектор, не зависящий от $\xi_{i,k}$ и $\eta_{l,k+1}$, с известным математическим ожиданием и ковариационной матрицей.

Считая истинной одну из этих m моделей, приходят к задаче проверки многих гипотез, которая решается на основе теории адаптивного оценивания, одним из

основоположников которой можно назвать Д.Г. Лайниотиса. При неизвестных априори распределениях возмущений и ошибок или в случае короткой истории об объекте предлагается разработать алгоритм на основе теории гарантированного оценивания, основные результаты которой приведены в гл. 1.

Если изменения в параметрах модели процесса являются незапланированными событиями, следовательно, их необходимо своевременно обнаруживать и корректировать модель, поэтому рассматриваются методы обнаружения изменения свойств динамических систем. Приводится обзор методов и моделей для прогнозирования, рассматриваются существующие методы прогнозирования с использованием метода аналогов и ближайших соседей.

Во второй главе рассматривается задача моделирования изменения трафика. Голосовой трафик измеряется в минутах и связан с числом абонентов через MOU (средний трафик на одного абонента в месяц). Модель для изменения трафика записывается в виде:

$$z(t) = MOU(t) \cdot f(t), \quad (1)$$

где $f(t)$ – функция, описывающая изменение числа абонентов (рис. 1).

В общем случае коэффициент MOU является медленно меняющейся величиной и может быть описан функцией, зависящей от времени.

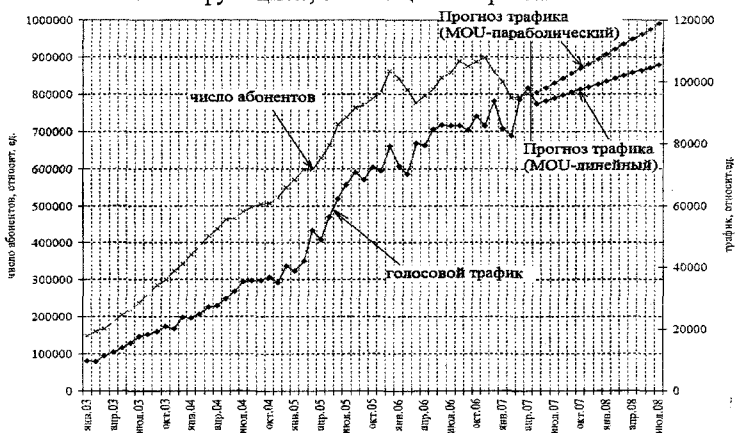


Рис. 1. Число абонентов и трафик для Челябинского отделения

Поскольку информация по трафику по другим операторам отсутствует, предлагается использовать информацию о числе абонентов других предприятий, а также в других регионах с целью выявления общих закономерностей развития в условиях неопределенности и построения модели изменения числа абонентов для предприятия сотовой связи.

Известны месячные данные, о числе абонентов y_{ik} , $k = \overline{1,75}$, где i – номер региона или предприятия, которые могут содержать ошибки, уравнение наблюдений можно записать в виде $y_{ik} = x_{ik} + \eta_{ik}$, где η_{ik} – ошибки фактических данных, статистическое описание которых отсутствует.

Предлагается модель изменения числа абонентов, учитывающая особенности конкретного региона или предприятия и по существу представляющая процесс в виде суммы логистических функций. Изменение числа абонентов описывается следующей моделью:

$$f(t) = \sum_{j=1}^m \theta_j(t-t_j) \cdot x_j(t-t_j), \quad (2)$$

где $\theta_j(t-t_j) = 1$, если $t \geq t_j$, и $\theta_j(t-t_j) = 0$, если $t < t_j$.

Пусть $\tau = t - t_j$, $\tau \in [0, \infty)$, где $x_j(\tau)$ – решения нелинейного дифференциального уравнения вида

$$\frac{dx_j}{d\tau} = (\alpha_j + \beta_j x_j)(P_j - x_j), \quad (3)$$

где $t_j > 0$ – моменты времени, когда добавляется новое j -ое слагаемое, которое учитывает прошедшие изменения, m – количество слагаемых,

$f(t) \rightarrow P = \sum_{j=1}^m P_j$ при $t \rightarrow \infty$ P – емкость (максимальное число абонентов),

$\alpha_j, \beta_j > 0$ – коэффициенты, учитывающие интенсивность рекламной компании и скорость распространения информации об услуге соответственно.

Каждое слагаемое для модели (2), (3) имеет вид

$$x_j(\tau) = \frac{P_j C_j \exp(\gamma_j \tau) - \alpha_j / \beta_j}{1 + C_j \exp(\gamma_j \tau)}, \quad C_j = \frac{x_j(0) + \alpha_j / \beta_j}{P_j - x_j(0)}, \quad \gamma_j = \beta_j + \alpha_j / P_j. \quad (4)$$

При моделировании процесса распространения сотовой связи в Челябинской области уравнениями (2),(4) (рисунок 2) ошибка аппроксимации составила 2%, где данные о числе абонентов известны за 82 месяца. Под процентом проникновения понимается число абонентов, деленное на численность населения в регионе. Потенциальная емкость числа абонентов Челябинской области, измеряемая в процентах проникновения, равна $P = P_1 + P_2 + P_3 - P_4$ и составляет 119,8 %. Оценки параметров модели получены методом наименьших квадратов (табл. 1).

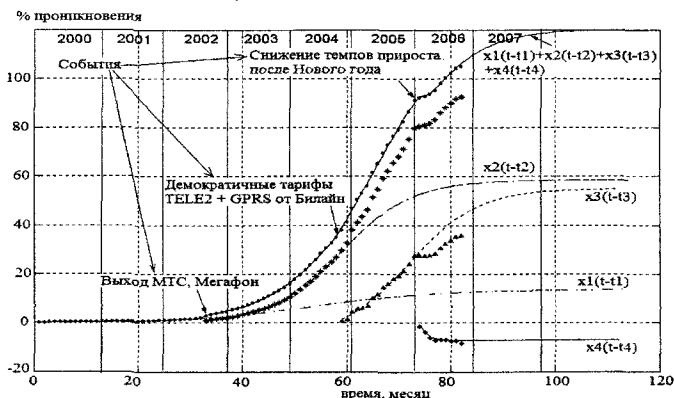


Рис. 2. Моделирование изменения числа абонентов

Таблица 1

№ индекса (№ слагаемого)	α_j	β_j	P_j	t_j
1	0,0	0,086	13,586	1
2	0,018	0,148	58,606	32
3	0,835	0,136	55,053	58
4	2,746	0,589	7,442	73

Предложенная модель обладает адаптивными свойствами. В случае если реальный ход событий существенно отличается от моделируемого, вводится дополнительное слагаемое в правую часть функции (2), для своевременной корректировки прогнозов. Моменты возникновения таких ситуаций обозначаются t_j . Поэтому одна из первых задач – это определение моментов t_j или задача обнаружения изменения течения процессов по отношению к ранее существовавшим закономерностям, которые учитывались математической моделью. При моделировании изменения числа абонентов установлено, что такие моменты, либо связаны с конкретными событиями в регионе, например, выходом конкурентов на рынок, либо имеют другие причины, происхождение которых не установлено.

Для определения моментов обнаружения изменения поведения кривых, описывающих изменение числа абонентов, разработан эвристический алгоритм текущего обнаружения, с использованием скользящего окна. К моменту времени t известна информация о наблюдениях y_t , где $t = \overline{1, t}$, строится аппроксимация f_t по модели (2)-(4) по данным y_t , где $t = \overline{1, t-3}$, обозначим $\zeta_t = y_t - f_t$. Тогда оценку момента изменения свойств процесса можно вычислить согласно выражениям

$$t_0 = t_a - n_{t_a} + 1, t_a = \inf\{t : g_t \geq h\}, g_t = (\zeta_t^p + \zeta_{t-1}^p + \zeta_{t-2}^p), g_0 = 0.$$

Здесь h – порог, выбираемый заранее, t_a – момент подачи сигнала о наличии изменений, индекс p – означает, что это ошибка «прогноза»; $n_t = n_{t-1}I(g_{t-1}) + 1$; $I(y_t)$ – функция: $I(y_t > y_{t-1}) = 1$, $I(y_t \leq y_{t-1}) = 0$, $I(0) = 0$, т.е. n_t – счетчик числа наблюдений, прошедших после последнего $g_t = 1$. Проведены исследования работоспособности алгоритма на данных о числе абонентов в регионах и установлено, что запаздывание в обнаружении изменения в параметрах модели составляет от 1 до 5 месяцев в зависимости от заданных региона и величины порога h .

В третьей главе описаны разработанные методы прогнозирования на основе информации об аналогичных объектах и алгоритм адаптивного оценивания; приводятся результаты применения разработанных алгоритмов для оценивания и прогнозирования числа абонентов в регионе.

Для решения задачи прогнозирования числа абонентов используются статистические данные не только по данному конкретному региону, но и по другим регионам РФ, в целом РФ с целью выявления «близкого» (похожего) для данного региона другого региона или группы регионов. «Близкий» регион можно рассматривать как ближайший аналог в том смысле, что рассматриваемый регион будет в ближайшей перспективе развиваться также.

Критерий 1. Объект называется ближайшим аналогом (далее просто аналог) рассматриваемому объекту в момент времени $k = p$ если выполнено условие:

$$J_i = \sum_{k=p-\Delta}^{p+\Delta} (y_k - y_{i, k-\tau^i})^T Q_k (y_k - y_{i, k-\tau^i}) \rightarrow \min, \quad (5)$$

где $I = \{1, 2, \dots, m\}$ – множество аналогичных объектов, τ^i – сдвиг по оси времени для наложения траектории i -го объекта на траекторию объекта, для которого ищутся ближайшие аналоги, 2Δ – временной интервал минимизации, т.е. наилучшего совпадения траекторий, $y_{i, k-\tau^i}$ – вектор наблюдений в момент времени $k - \tau^i$ для i -го аналогичного объекта, y_k – вектор наблюдений интересующего объекта, Q_k – известные положительно определенные и симметричные матрицы.

Критерий 2. Объект называется ближайшим аналогом рассматриваемому объекту в момент времени $k = p$ на временном интервале 2Δ , если выполнено условие

$$J_i = \sum_{k=p-\Delta}^{p+\Delta} (|\Delta y_k| - |\Delta y_{i, k-\tau^i}|)^T Q_k (|\Delta y_k| - |\Delta y_{i, k-\tau^i}|) \rightarrow \min, \quad (6)$$

где $\Delta y_k = y_k - y_{k-1}$, $|\cdot|$ – означает модуль.

Первый объект-аналог определяется согласно

$$J^* = \min_{i \in I} J_i, \quad (7)$$

где индекс i^* соответствующий J^* является индексом объекта, являющегося первым объектом-аналогом (рис. 3).

Для определения второго аналога, положим $I = I \setminus \{i^*\}$ и вновь применив (7) к множеству объектов I , получим минимальное значение критерия (5) или (6) и соответственно индекс для второго аналога и т.д. Условие остановки определения аналогов имеет вид $J^* > \varepsilon$, где ε – заданная скалярная величина. Таким образом, в результате решения задачи (5) или (6) определяются регионы-аналоги и, благодаря их траекториям, формируется прогноз даже в отсутствии модели процесса.

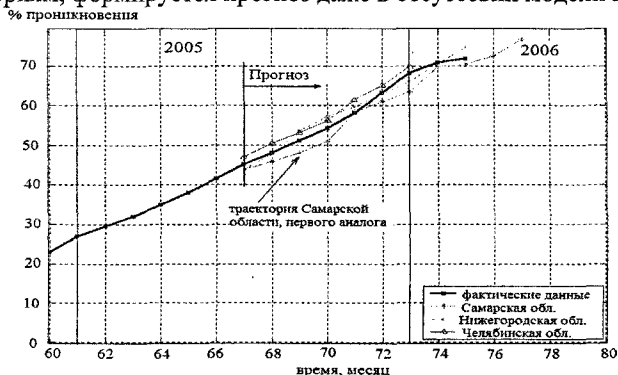


Рис. 3. Прогноз по траекториям регионов-аналогов для Курганской обл.

Для оценивания текущего числа абонентов разработан алгоритм, использующий информацию о траекториях регионов-аналогов, на основе параллельных фильтров Р. Калмана. Изменение числа абонентов представляется в виде

$$x_{k+1} = x_k + (\alpha + \beta x_k) \cdot (P - x_k) + \zeta_k, \quad y_{k+1} = x_{k+1} + \eta_{k+1}, \quad k = t_{j-1}, \dots, t_j. \quad (8)$$

Здесь t_{j-1} – момент появления предыдущего слагаемого, t_j – момент времени, в который появляется новое слагаемое, $x_k \in R^1$.

Согласно подходу, основанному на кусочно-линейной аппроксимации нелинейных характеристик, изменение числа абонентов представляется в виде

$$s_{k+1} = A_k s_k + \xi_k + c_k, \quad y_{k+1} = G s_{k+1} + \eta_{k+1}, \quad k = t_{j-1}, \dots, t_j; \quad s_k, c_k \in R^4, \quad (9)$$

где $s_k = [x_k, \alpha_k, \beta_k, P_k]^T$, $G = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$, $A_k = \left[\frac{\partial \psi(s)}{\partial s} \right]_{s=s_k}$, $c_k = \psi(s_k) - A_k s_k$, функция $\psi(s_{1k}) = \varphi(x_k) = x_k + (\alpha + \beta x_k)(P - x_k)$, $\psi(s_{ik}) = s_{ik}$, $i=2,3$.

Считаются известными статистические характеристики ошибок наблюдений $\eta_k: M\eta_k = 0$, $M[\eta_k \eta_k^T] = r$ и возмущений $\xi_k: M\xi_k = 0$, $M[\xi_k \xi_k^T] = Q$, также известны $Ms_0 = \hat{s}_0$, $M[(s_0 - Ms_0)(s_0 - Ms_0)^T] = P_0$, $M[(s_0 - Ms_0)\eta_k^T] = 0$. Уравнения фильтра Калмана для системы (9) имеют вид:

$$\hat{s}_{k+1} = \bar{s}_{k+1} + \Lambda_{k+1}(y_{k+1} - G\bar{s}_{k+1}), \quad \bar{s}_{k+1} = A_k \Big|_{s=\hat{s}_k} \hat{s}_k + c_k, \quad k = t_{j-1}, \dots, t_j, \quad (10)$$

$$\Lambda_{k+1} = P_{k+1} G^T r^{-1}, \quad P_{k+1} = M_{k+1} - M_{k+1} G^T (GM_{k+1} G^T + r)^{-1} GM_{k+1},$$

$$M_{k+1} = A_k P_k A_k^T + Q, \quad P_{z_{k+1}} = G_{k+1} M_{k+1} G_{k+1}^T + r,$$

здесь матрицы M_k, A_k, P_k имеют размерность 4×4 , матрица $A_k - 4 \times 1$, $P_{z_{k+1}}$ – матрица (скаляр) ковариаций вектора невязок $z_{k+1} = y_{k+1} - G\bar{s}_{k+1}$.

Имеются данные о числе абонентов $y_{i \ k+1}$, $i \in I$, $I = \{1, 2, \dots, m\}$ в других m регионах, описываемых известными уравнениями вида (9)

$$s_{ik+1} = A_{ik} s_{ik} + \xi_k + c_{ik}, \quad y_{ik+1} = G s_{ik+1} + \eta_{k+1}, \quad k = 0, 1, \dots, n-1, \quad i \in I. \quad (11)$$

После обнаружения момента изменения в параметрах модели или в случае, когда траектории регионов-аналогов перестали быть ближайшими аналогами, определяются новые регионы-аналоги по критерию (5) или (6).

Далее вычисляются возможные очередные слагаемые с момента времени $k = p$ – обнаружения изменения $\tilde{x}_{i \ k} = y_{i \ k} - f_k$, $i = \overline{1, q}$, $k \geq p$, здесь $y_{i \ k}$ – данные i -го региона-аналога в момент времени k , q – количество регионов-аналогов,

$f_k = \sum_{j=1}^q \theta_j x_{j \ k-t_j}$, s – текущее число слагаемых. Затем проводится оценка коэффициентов α_i, β_i, P_i для каждого нового \tilde{x}_i .

Для отслеживания вектора состояния в дальнейшем оценивается не вся сумма

$f_k = \sum_{j=1}^q \theta_j x_{j \ k-t_j} + \tilde{x}_k$, а вновь введенное слагаемое \tilde{x}_k в соответствии с моде-

лями вида (11), где $s_{ik} = \tilde{s}_{ik} = [\tilde{x}_{ik}, \alpha_{ik}, \beta_{ik}, P_{ik}]^T$, $c_{ik} = \tilde{c}_{ik}$, в качестве измерений \tilde{y}_{ik} используются $\tilde{y}_k = y_k - \sum_{j=1}^s \theta_{jk-l_j} x_{jk-l_j}$, где y_k – реальные данные.

Имея возможные траектории развития, используется несколько фильтров Калмана параллельно, т.е. обрабатывается информация не об одном ближайшем аналоге, а о нескольких. Результирующая оценка вычисляется как:

$$\hat{x}_k = f_k + \sum_{i=1}^q \hat{x}_{ik} p(H_i | k),$$

где q – число проверяемых гипотез H_i , которое равно числу аналогов; $p(H_i | k)$ – апостериорные вероятности этих гипотез, рассчитываемые согласно с теорией адаптивного оценивания Д.Г. Лайниотиса по соотношениям:

$$p(H_i | k) = \frac{L(k | H_i)}{\sum_{j=1}^q p(H_j) L(k | H_j)} p(H_i), \quad L(k | H_i) = |P_{zik}|^{-1/2} \exp\left\{-\frac{1}{2} z_{ik}^T P_{zik}^{-1} z_{ik}\right\},$$

где $z_{ik} = y_{ik} - G\bar{x}_{ik}$ – невязка, соответствующая i -й модели, $p(H_i)$ – априорные вероятности гипотез, где $\sum_{i=1}^q p(H_i) = 1$.

При совместной обработке нескольких моделей используются следующие критерии для останова. На каждом шаге k фильтрации проверяется условие

$$(z_{1k}^T z_{1k} > \gamma Sp(P_{z_{1k}})) \& \dots \& (z_{qk}^T z_{qk} > \gamma Sp(P_{z_{qk}})). \quad (12)$$

Здесь Sp означает след матрицы. Если условие (12) не выполняется, то процесс оценивания продолжается, иначе выбираются новые регионы-аналоги, вновь формируются возможные направления для нового слагаемого и вновь запускается процесс оценивания.

В четвертой главе оценка вектора состояния объекта вычисляется на основе параллельной работы фильтров, как и в гл. 3 с использованием информации о траекториях движения объектов-аналогов, но в предположении отсутствия статистического описания неопределенностей, например, в случае наличия короткой выборки. Поэтому применяется гарантированный подход с использованием минимаксных фильтров, где оценка вектора состояния объекта находится как пересечение множеств, полученных от нескольких фильтров.

Рассматривается объект, описываемый уравнениями вида

$$x_{k+1} = A_k x_k + w_k + c_k, \quad y_{k+1} = G x_{k+1} + v_{k+1}, \quad k = 0, 1, \dots, n-1. \quad (13)$$

Информация о векторах w_k, v_{k+1}, x_0 ограничивается заданием включений

$$x_0 \in X_0, \quad w_k \in W, \quad v_{k+1} \in V, \quad (14)$$

где X_0, W, V – известные выпуклые компакты. Матрица A_k считается неизвестной, c_k – неизвестная функция, матрица G – известна.

Существует множество других объектов $I = \{1, 2, \dots, m\}$, описываемых известными уравнениями движения и измерений

$$x_{ik+1} = A_{ik}x_{ik} + w_{ik} + c_{ik}, \quad y_{ik+1} = Gx_{ik+1} + v_{ik+1}, \quad k = 0, 1, \dots, n-1, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (15)$$

Информация о векторах x_{i0}, w_{ik}, v_{ik+1} ограничивается заданием включений

$$x_{i0} \in X_0, \quad w_{ik} \in W_i, \quad v_{ik+1} \in V_i, \quad (16)$$

где W_i, V_i – известные выпуклые компакты.

Определив q ($q < m$) объектов-аналогов в момент времени $k = p$ по критерию (5) или (6), полагаем, что истинная модель движения объекта (13) совпадает с одной из q моделей движения (15) объектов-аналогов. Для вычисления оценки вектора состояния объекта работают параллельно q фильтров, для которых уравнение движения и измерений имеют вид (15), и в качестве измерений y_{ik+1} в каждом фильтре выступают измерения y_{k+1} интересующего объекта. Информационное множество, которому должна принадлежать оценка вектора состояния объекта на $k+1$ и последующих шагах вычисляется согласно выражениям

$$X_{ik+1} = X_{ik+1/k} \cap X[y_{k+1}], \quad k = 0, \dots, n-1, \quad i = 1, \dots, q, \quad (17)$$

$$X[y_{k+1}] = \{x \mid Gx + v = y_{k+1}, v \in V\}, \quad (18)$$

$$X_{ik+1/k} = A_{ik}X_k + W_i + c_{ik}. \quad (19)$$

Здесь $X_{ik+1/k}$ – априорное множество прогнозов, $X[y_{k+1}]$ – множество, совместимое с результатами измерений. Обозначим через $L_{k+1} = \{1, 2, \dots, q\}$ – множество моделей вида (10) на шаге $k+1$. Если при $l_1 \in L_{k+1}$ $X_{l_1 k+1} = \emptyset$, тогда $L_{k+1} = L_{k+1} \setminus \{l_1\}$. Если при $l_1, l_2 \in L_{k+1}$ $X_{l_1 k+1} = \emptyset$ и $X_{l_2 k+1} = \emptyset$, тогда $L_{k+1} = L_{k+1} \setminus \{l_1, l_2\}$ и так далее. Тогда результирующее информационное множество находится как пересечение

$$X_{k+1} = \bigcap_{i \in L_{k+1}} X_{ik+1}. \quad (20)$$

Таким образом, множества X_{k+1} для всех $k+1 \geq 1$ удовлетворяют рекуррентным соотношениям (17)-(20).

Алгоритм адаптивной фильтрации (ААФ).

Шаг 1. Информационное множество вычисляется в результате (17)-(19), где $i = 1$. Если $X_{1k+1} = \emptyset$, то переход к шагу 2. Если $X_{1k+1} \neq \emptyset$, то положить $k = k+1$ и переход к шагу 1.

Шаг 2. Определить объекты-аналоги согласно (5) или (6), взять их модели движения вида (15) для дальнейшей оценки вектора состояния объекта. Переход к шагу 3.

Шаг 3. Вычислить X_{ik+1} по выражениям (17)-(19). Если для $\forall i = \overline{1, q}$ $X_{ik+1} = \emptyset$, то вывод – обнаружена разладка в момент времени $k+1$ и переход к шагу 6, иначе шаг 4.

Шаг 4. Если для l множеств $X_{lk+1} = \emptyset$, где $l < q$, то соответствующие l моделей заменить на модели новых объектов-аналогов, путем их определения по критерию (5) или (6), множества X_{lk+1} скорректировать. Переход к шагу 5. Если не

удается найти часть l' или все l объектов-аналогов, тогда положить $q = q - l'$ или $q = q - l$ и переход к шагу 5.

Шаг 5. Вычислить информационное множество X_{k+1} согласно (20), положить $k = k + 1$, переход к пункту 3. Если $X_{k+1} = \emptyset$ или для $\forall q$ $X_{ik+1} = \emptyset$ и соответственно, $X_{k+1} = \emptyset$, то переход к шагу 6.

Шаг 6. Заменить все q моделей на новые. Положить $X_{k+1} = X[y_{k+1}]$, $k = k + 1$, переход к шагу 3. Если не удается найти часть l' объектов-аналогов, тогда положить $q = q - l'$ и переход к шагу 3.

Применим алгоритм для оценивания текущего числа абонентов. Изменение числа абонентов представляется, как и в гл.3 в виде (8)

$$x_{k+1} = \varphi(x_k) + \omega_k, y_{k+1} = x_{k+1} + v_{k+1}, k = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (21)$$

где $x_k \in R^1$, $\omega_k \in [-\mu, \mu] = W \subset R^1$, $v_{k+1} \in [-\nu, \nu] = V \subset R^1$, $x_0 \in [-l_0, l_0] = X_0$, здесь $\varphi(x_k) = x_k + (\alpha + \beta x_k)(P - x_k)$, числа $\mu \geq 0$, $\nu \geq 0$, $l_0 \geq 0$ – также заданы, P – потенциальное число абонентов.

Функция $\varphi(\cdot)$ – нелинейная, монотонная и удовлетворяет условию Липшица, покажем что для случая $x_k \in R^1$ соотношения (17) – (20) применяются без линейной аппроксимации. Информационное множество для задачи (21) имеет вид

$$X_{k+1} = X_{k+1/k} \cap X[y_{k+1}], \quad (22)$$

где априорное множество прогнозов $X_{k+1/k}$ и множество совместимое с результатами измерений $X[y_{k+1}]$ определяются выражениями

$$X_{k+1/k} = \check{X}_k + W, \check{X}_k = \{\varphi(x_k) \mid x_k \in X_k\}, \\ X[y_{k+1}] = \{x \mid x + v = y_{k+1}, v \in V\}.$$

Под информационным множеством задачи минимаксной фильтрации, которое получается в результате операции пересечения (22), понимается $X_{k+1} = \{\hat{x}_{k+1} : x_0 \in X_0, \omega_k \in W, v_{k+1} \in V\}$. Точечная оценка x_{k+1}^* – чебышевский центр множества X_{k+1} представляет собой в одномерном случае центр отрезка.

Поскольку известна информация об изменении числа абонентов в многих регионах, соответственно, имеем m моделей вида (21):

$$x_{ik+1} = \varphi_i(x_k) + \omega_{ik}, y_{ik+1} = x_{ik+1} + v_{ik+1}, k = 0, 1, \dots, N - 1, i = 1, 2, \dots,$$

где векторы $\omega_{ik}, v_{ik+1}, x_{i0}$ удовлетворяют условию (16), а функции $\varphi_i(x_k) = x_k + (\alpha_i + \beta_i x_k)(P_i - x_k)$.

В случае обнаружения разладки привлекается информация об изменении числа абонентов в других регионах, путем нахождения ближайших регионов-аналогов в данный момент времени, обозначим его k^* . Далее применяется алгоритм адаптивного оценивания (17) – (20) с использованием двух регионов-аналогов, для которого выражение (17) и (18) не изменится, а (19) будет иметь вид

$$X_{ik+1/k} = \{\varphi_i(x_k) \mid x_k \in X_k\} + W_i, k = k^* + 1, \dots, n, i = 1, 2. \quad (23)$$

Случай возникновения пустого пересечения в (23) означает, что модель региона-аналога перестала корректно описывать изменение числа абонентов и необходимо заменить ее новой моделью, которая определяется по данным нового региона-аналога. После смены одного или двух аналогов оценивание продолжается.

На шаге 2 алгоритма ААФ после определения 2-х регионов-аналогов, определяются параметры их моделей $\hat{\alpha}_i, \hat{\beta}_i, \hat{P}_i, i = 1, 2$ по известной истории развития аналогов за интервал времени от $k - \tau_i$ до k , где k – текущий момент времени, τ_i – сдвиг по времени траектории i -го аналога. Параметры удовлетворяют следующим ограничениям $0 \leq \hat{\alpha}_i \leq \alpha_u, 0 \leq \hat{\beta}_i \leq \beta_u$ и $y_{i, k-\tau_i} \leq \hat{P}_i \leq P_{iu}$, т.е. параметр емкость числа абонентов для модели с индексом i должен быть не меньше числа абонентов в i -м регионе на момент времени $k - \tau^i$.

Гарантированная оценка рассчитывалась в течение 48 месяцев, и разладка в этом случае была обнаружена в моменты времени $k = 33$ и $k = 46$ (рис. 4). До момента времени $k = 25$ работал один фильтр, оценки параметров $\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{P}$ для первоначальной модели были определены по 10 известным точкам методом наименьших квадратов. Регионами-аналогами для определения параметров являлись: Нижегородская область, Москва и Московская область, республика Татарстан, Новосибирская область, Самарская область и Санкт-Петербург и Ленинградская область. Поскольку в реальной задаче о числе абонентов истинное их значение неизвестно, то приводится ошибка $\tilde{\epsilon}_k = (\bar{x}_k^* - x_k^*) \cdot 100\% / \bar{x}_k^*$, где \bar{x}_k^* – центр отрезка множества $X[y_k]$ совместимого с результатами измерений и x_k^* – центр отрезка результирующего множества X_k . Ошибка $\tilde{\epsilon}_k$ не превосходит 5% при работе ААФ.

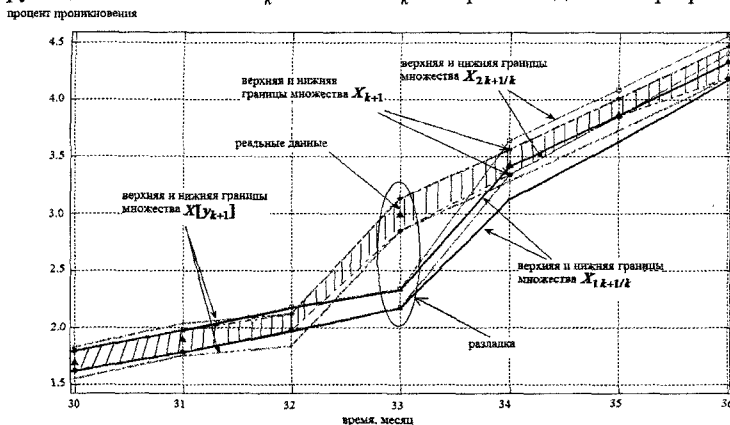


Рис. 4. Гарантированная оценка числа абонентов в Челябинской обл.

При сравнении результатов оценивания минимаксного фильтра и фильтра Калмана для нелинейной одномерной модели вида (21) было установлено, что как минимум в половине случаев более точные множественные оценки с точностью до 2σ получены минимаксным фильтром. Это обусловлено использованием

уравнений модели в явном виде при применении минимаксного фильтра и тем, что возмущения и ошибки измерений не являются гауссовским белым шумом.

В пятой главе описывается разработанное программное обеспечение (ПО) для поддержки принятия решений на предприятии сотовой связи. Данное ПО адресовано специалистам, занимающимся прогнозированием на предприятиях сотовой связи, на основе использования данных о трафике и числе абонентов предприятия, а также числе абонентов в других регионах.

ПО состоит из 4-х модулей. Входной информацией для работы с модулями служат данные о проценте проникновения сотовой связи в различных регионах с дискретной месяц и данные о числе абонентов предприятия в разных регионах, а также о числе абонентов других предприятий, если такая информация имеется. ПО, реализующее методы прогнозирования (гл. 3), модель суммы логистических кривых и алгоритм обнаружения изменений (гл. 2), а также алгоритмы оценивания (гл. 3 и 4) предназначено для оперативного получения прогнозов и оценивания числа абонентов в регионе; трафика и числа абонента отдельного предприятия; обнаружения изменений ситуации как в регионе, так и на предприятии; для построения прогнозов других показателей предприятия.

В заключении сформулированы основные теоретические и практические результаты диссертационного исследования.

В приложении 1 приведены акты об использовании и о внедрении результатов диссертационной работы в ОАО «Уралсвязьинформ».

В приложении 2 представлены схемы радиопокрытия сотовой связи ОАО «Уралсвязьинформ» для Челябинской и Курганской областей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в диссертационной работе исследования позволили сформулировать следующие основные научные выводы и результаты.

1. Установлено, что математическая модель изменения трафика и числа абонентов представима в виде суммы логистических функций с запаздыванием по времени. В результате обеспечивается ошибка аппроксимации не более 3%. Существенное изменение темпов роста числа абонентов по сравнению с ранее существовавшими закономерностями обусловлено, как правило, событиями на рынке, например, такими как приход еще одного участника рынка.

2. Установлено, что для процесса изменения числа абонентов при изменении характера событий в регионе (выход нового конкурента, демпинговая политика операторов и др.) можно найти соответствующую группу объектов-аналогов, развитие событий в которых совпадает с заданной точностью. Аналогичное поведение событий может сохраняться до 8–11 месяцев.

3. Использование траекторий объектов-аналогов при построении прогнозов возможных развитий событий вместе с предложенной моделью позволяет указывать еще несколько траекторий, совокупность которых образует прогнозный «коридор», а также непрерывно уточнять прогнозы по ходу развития событий.

4. Предложенная модель в виде суммы логистических функций с запаздыванием по времени позволяет описывать развитие процессов по траекториям близким к логистическим кривым. Модель адаптируется к прошедшим и будущим изменениям посредством ввода нового слагаемого. Ошибка прогнозирования числа абонентов на 3–6 месяцев составляет не более 5–6%, на год – 10%.

5. Разработан алгоритм текущего обнаружения изменения в параметрах модели для определения моментов ввода нового слагаемого в построенную модель на основе последовательного подхода, подтвердивший свою эффективность на статистических данных. Запаздывание в обнаружении составляет от 1 до 5 месяцев в зависимости от региона и величины порога. Для региональных данных о числе абонентов количество точек изменения варьируется от 2 до 4 за период наблюдения с декабря 1999 г. до декабря 2006 г.

6. Разработан метод прогнозирования числа абонентов на основе процедуры поиска ближайшего аналога среди множества аналогичных объектов. Метод применяется в случае либо отсутствия модели процесса, либо когда происходят изменения в параметрах модели и их оценка неизвестна. В результате определяется группа объектов-аналогов, которая может состоять из 1–4 аналогов, траектории которых путем сдвига по оси времени «накладываются» на траекторию развития рассматриваемого объекта, тем самым получается прогноз. Ошибка прогнозирования с использованием регионов-аналогов составляет от 8 до 10 % на период до 6 месяцев.

7. Разработаны алгоритмы адаптивного оценивания числа абонентов по информации о ближайших объектах-аналогах на основе параллельной работы фильтров. Адаптация заключается в смене и поиске новых объектов-аналогов с целью использования их моделей движения в случае изменения параметров модели, либо когда модели объектов-аналогов перестают быть аналогами. Ошибка при использовании алгоритма адаптивного оценивания на данных о числе абонентов в регионах не превышает 4% при стохастическом подходе и 5–6% при минимаксном подходе.

8. Разработано программное обеспечение для использования разработанных алгоритмов и методов. Программное обеспечение позволяет оперативно получать прогнозы по трафику, числу абонентов предприятия, доли на рынке и процента проникновения сотовой связи в регионе, а также прогнозировать развитие других услуг и показателей предприятия.

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ В ВЕДУЩИХ РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ ЖУРНАЛАХ ВАК

1. Афанасьева, К.Е. Идентификация состояния и прогнозирование регионального рынка / К.Е. Афанасьева, В.И. Ширяев // Проблемы управления. – 2007. – №3. – С. 63–65.
2. Афанасьева, К.Е. Прогнозирование региональных рынков сотовой связи / К.Е. Афанасьева, В.И. Ширяев // Проблемы прогнозирования – 2007.– №5. – С. 97–105.

3. Афанасьева, К.Е. Адаптивное оценивание и прогнозирование в динамических системах на основе гарантированного подхода / К.Е. Афанасьева, В.И. Ширяев // Мехатроника, автоматизация, управление. –2008. – №8. – С. 2–7.

ДРУГИЕ ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

4. Кувшинов, Б.М. Применение методов распознавания образов и минимаксной фильтрации для задачи оценивания спроса на товар / Б.М. Кувшинов, К.Е. Афанасьева // Проблемы теоретической и прикладной математики. Тез. докл. XXXIV Региональной молодежной шк.-конф.– Екатеринбург: ИММ УрО РАН, 2003. – С. 185–188.
 5. Ширяев, В.И. Оценивание спроса на товар по социально-экономическому положению регионов / В.И. Ширяев, Б.М. Кувшинов, К.Е. Афанасьева // Математическое программирование и приложения: Тез. докл. XII Всеросс. конф. – Екатеринбург: ИММ УрО РАН, 2003. – С. 249–250.
 6. Afanasyeva, K.E. Forecasting of market capacity dynamics for RF's regions / K.E. Afanasyeva, A.V. Blinov, B.M. Kuvshinov, V.I. Shiryaev // Proceedings of the international conference Mathematical modeling of social and economical dynamics. – М.: RSSU, 2004. – P. 8–11.
 7. Афанасьева, К.Е. Математическое моделирование и прогнозирование региональных рынков / К.Е. Афанасьева, В.И. Ширяев // Оптимизация, управление, интеллект. – 2005. – №2(10). – С. 118–125.
 8. Ширяев, В.И. Моделирование региональных рынков / В.И. Ширяев, К.Е. Афанасьева // Идентификация систем и задачи управления: Сб. докл. V Междунар. конф. – М.: ИПУ РАН, 2006. – С.549–558.
 9. Афанасьева, К.Е. Прогнозирование потребления услуг предприятия / К.Е. Афанасьева, В.И. Ширяев // Управление инновациями: Сб. тез. докл. Междунар. конф. – М.: ИПУ РАН, 2007. – С.410–413.
 10. Афанасьева, К.Е. Прогнозирование трафика для планирования развития ресурсов предприятия сотовой связи / К.Е. Афанасьева, В.И. Ширяев // Информационные и телекоммуникационные технологии в региональном, муниципальном и корпоративном управлении: Науч. тр. – Челябинск: ЮУрГУ, ЦНТИ, 2008.– С. 308–314.
- Другие публикации соискателя по использованию алгоритмов оценивания:
11. Точность управления летательным аппаратом в условиях неопределенности на этапе захода на посадку / М.О. Антонов, В.И. Ширяев, К.Е. Афанасьева, А.И. Коблов // Авиакосмическое приборостроение. –2004. – №7. – С. 64–69.
 12. Алгоритмы оценивания и управления беспилотным летательным аппаратом в условиях неопределенности / В.И. Ширяев, К.Е. Афанасьева, М.О. Антонов, А.И. Коблов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. –№8. – С. 48–51.
 13. Алгоритмы оценивания и управления беспилотным летательным аппаратом на этапе посадки / М.О. Антонов, К.Е. Афанасьева, А.И. Коблов, В.И. Ширяев // Изв. АН. Теория и системы управления.– 2005.– №2. – С. 166–173.