

А. Х. Султанов, И. В. Кузнецов, А. Э. Камалов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КАНАЛЬНО-ВРЕМЕННОГО РЕСУРСА МЕЖДУ ПОДСИСТЕМАМИ СЕТИ ШИРОКОПОЛОСНОЙ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ СОСТОЯНИЙ НАБЛЮДЕНИЙ

Рассмотрен алгоритм моделирования процесса распределения канально-временного ресурса между подсистемами сети широкополосной мобильной связи в условиях неопределенности состояний наблюдений. *Канально-временной ресурс; позиционирование; скрытые марковские модели; алгоритм Витерби*

ВВЕДЕНИЕ

Тенденции развития систем мобильной связи связаны с увеличением широкополосности каналов передачи, позволяющих передавать сигналы сообщений различного вида: голосовые, видео, наборы данных и т. д. Применение широкополосных мультисервисных систем требует соответствующего совершенствования алгоритмов управления радиоресурсами (канального, частотно-временного ресурса). Это обусловлено следующими факторами:

- сложностью поддержания широкополосной связи во всем диапазоне частот на всей территории зоны обслуживания;
- возможным резким локально-территориальным изменением нагрузки в условиях неопределенности позиционирования мобильных станций.

Алгоритмы управления радиоресурсами условно можно разбить на два класса, отражающие различные подходы к описанию моделей трафика в радиосистеме. Их называют моделями класса А и В [1]. В основе модели класса А лежит описание трафика в отдельно взятой ячейке зоны обслуживания мобильной сети. В этой модели пользователи представляются как совокупность отдельных источников трафика, случайно блуждающих по зоне обслуживания и случайно генерирующих запросы на ресурсы – радиоканалы. Модель А отражает трафик с точки зрения потребности мобильного пользователя. Модель В сетевого трафика описывает изменение нагрузки как наблюдаемый от «неподвижных» элементов сети – базовых станций. Эта модель характеризует пространственное и временное распределение интенсивности трафика с «точки зрения» оператора связи.

Недостатком модели А может служить чрезмерное расходование внутрисистемных информационных ресурсов из-за необходимости слежения за всеми передвижениями мобильных станций, что в итоге приводит к блокировкам связи. Недостатком второй модели является слабая гибкость управления радиоресурсами, что может вызвать «перегруз» сети в одной ее части при существенной «недогрузке» в другой из-за различной концентрации абонентов в зоне обслуживания.

Компромиссным решением совершенствования процесса управления радиоресурсами может служить применение концепции ситуационно-адаптивного планирования [2] систем мобильной связи, которая позволит агрегировать преимущества описанных классов управления с учетом факторов, присущих широкополосным системам радиосвязи.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача управления радиоресурсами в системах широкополосной связи на основе концепции ситуационно-адаптивного планирования достаточно сложна и многопланова, поэтому удобно ее представить в концептуальном виде, состоящей из следующих шагов:

- разработка наблюдаемых моделей (ситуаций) трафика на основе географической модели подвижности абонентов, вида и характера предоставляемых услуг;
- разработка алгоритмов распознавания (идентификации) текущей ситуации и определения параметров трафика в условиях неопределенности состояний наблюдения (позиционирования мобильных станций);
- разработка критериев и алгоритмов управления (оптимизации) радиоресурсами.

Следует отметить, что каждая из вышеперечисленных задач включает целый ряд подзадач, точные формулировки и методы решения которых будут рассмотрены ниже.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАБЛЮДЕНИЯ

В качестве требований, предъявляемых к описанию моделей сетевого трафика:

- адекватность отражения потребности абонентов (соответствие модели А);
- доступность для внутрисистемного наблюдения (соответствие модели В).

На взгляд авторов, таким требованиям могут удовлетворять скрытые марковские модели (СММ) [2, 3], позволяющие описать нестационарные точечные процессы, доступные наблюдению. В основе модели описания трафика лежит понятие узла спроса. Узел спроса представляет локальный участок зоны обслуживания, показывая спрос на трафик в этой области. Понятие узлов спроса использует дискретизацию (локализацию) интенсивности нагрузки внутри зоны обслуживания системы мобильной связи и не привязано к электромагнитному покрытию зоны обслуживания, определяемой оператором связи.

Математическая модель трафика на основе СММ будет формулироваться следующим образом. Пусть S_1, S_2, \dots, S_N определяются как состояния модели (узлы спроса), $S = \{S_1, \dots, S_N\}$ – множество состояний модели (N – число узлов спроса). Пусть в дискретный момент t_i времени «звонок» поступает из любого (произвольного) узла спроса S_k . Ввиду того, что состояние S_k в наблюдаемый момент времени в общем случае может быть неизвестно, введем переменную q_t . Переменную q_t называют заявкой из некоторого узла спроса S_k в момент времени t_i . Должно быть известным распределение вероятностей выбора начального состояния $\pi = \{\pi_i\}$, т. е. $\pi_i = P(q_1 = S_i)$ (вероятность того, что в начальный момент $t = t_1$ будет поступать звонок из узла S_i); и известна условная вероятность перехода a_{kl} из состояния S_k в состояние S_l , т. е. $a_{kl} = P(q_t = S_l | q_{t-1} = S_k)$. Переходная вероятность a_{kl} удовлетворяет статистическим условиям, т. е.

$$a_{kl} \geq 0, \quad k, l = \overline{1, N} \quad \text{и} \quad \sum_{k=1}^N a_{kl} = 1, \quad l = \overline{1, N}.$$

Обозначим $A = \{a_{kl}\}$ матрицу переходных вероятностей размерности $N \times N$.

Вводится рассмотрение множества предоставляемых услуг $V = \{v_1, \dots, v_M\}$, где параметр v_m обозначает m -ю услугу, которая может быть «привязана» к адресу (номеру) входящего

«звонка»; M – число предоставляемых услуг. Множество V в СММ еще называют множеством наблюдаемых объектов.

Пусть в процессе наблюдения за обслуживаемой территорией в течение некоторого времени имеет место последовательность входящих «звонков» $O = \{o_1, \dots, o_T\}$, где o_n – некоторый объект (т. е. o_n – входящий звонок услуги v_m , «привязанный» к узлу спроса q_i); T – длина наблюдаемой последовательности объектов. Будем считать известной условную вероятность $b_l(m) = P(o_t = v_m | q_t = S_l)$ того, что в состоянии S_l наблюдался звонок абонента с заявкой на v_m услугу. Условная вероятность $b_l(m)$ должна удовлетворять условиям: $b_l(m) \geq 0, \quad l = \overline{1, N},$
 $m = \overline{1, M}, \quad \text{и} \quad \sum_{m=1}^M b_l(m) = 1, \quad l = \overline{1, N}.$

Совокупность всех условных вероятностей $b_l(m)$ образует матрицу B вероятностей появления m -го объекта при реализации l -го состояния размерности $N \times M$.

В итоге получаем скрытую Марковскую модель λ , которая описывается триадой матриц A, B, π , т. е. $\lambda = (A, B, \pi)$. Термин «скрытая» означает полное, либо частичное отсутствие информации о состоянии q_t системы в элементах o_i наблюдаемой (базовыми станциями, центром коммутации и обслуживания) последовательности $O = \{o_1, \dots, o_T\}$ в дискретные моменты времени t_i ($i = \overline{1, T}$). Другими словами, частичное отсутствие знаний о q_t в $O = \{o_1, \dots, o_T\}$ обуславливает неопределенность состояния наблюдений.

Будем считать, что в нестационарном процессе наблюдения можно выделить ряд «элементарных» стационарных (квазистационарных) ситуаций, например, резкое увеличение / снижение концентрации людей на улицах в начале и конце рабочего дня, периодические всплески на остановках общественного транспорта, перерывы в вузах. Поэтому для более полного описания изменения ситуаций понадобится совокупность (множество) моделей $\Lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_r\}$, где $\lambda_i = A_i, B_i, \pi_i$ ($i = \overline{1, r}$) – модель передачи сообщений, описывающая «элементарную» ситуацию в системе связи.

Таким образом, стохастическая модель «подвижности» трафика включает известную последовательность наблюдений O и репозиторий моделей Λ .

АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ СИТУАЦИЙ

Для получения характеристик трафика в узлах спроса следует определиться с текущей ситуацией и устранить неопределенность наблюдений, обусловленную нестационарностью потока заявок и неопределенностью позиционирования мобильных станций.

Формальная постановка задачи будет иметь вид: на основе известной последовательности наблюдений $O = \{o_1, \dots, o_T\}$ и множества ситуационных моделей $\Lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_v\}$ необходимо определить номер j^* прогнозируемой ситуации как максимум метрики $P(O | \lambda_j)$, т. е.

$$j^* = \operatorname{argmax}_{1 \leq j \leq v} (P(O | \lambda_j)), \quad (1)$$

где $P(O | \lambda_j)$ – условная вероятность того, что для заданной модели λ_j ($j = \overline{1, v}$) имеет место наблюдаемая последовательность объектов $O = \{o_1, \dots, o_T\}$.

Решение поставленной задачи определяется вычислением условной вероятности $P(O | \lambda_j)$. Эту подзадачу нетрудно решить, используя формулу полной вероятности:

$$\begin{aligned} P(O | \lambda_j) &= \sum_Q P(O | Q, \lambda_j) P(Q | \lambda_j) = \\ &= \sum_Q \pi_{q_1} b_{q_1}(o_1) a_{q_1 q_2} b_{q_2}(o_2) a_{q_2 q_3} \dots a_{q_{T-1} q_T} b_{q_T}(o_T), \end{aligned} \quad (2)$$

где знак Q обозначает, что суммирование производится по всем счетным комбинациям последовательности состояний наблюдения. Согласно выражению (2) при прямом подсчете $P(O | \lambda_j)$ для самого наихудшего случая необходимо выполнить $2TN^T$ умножений, что затрудняет прогнозирование ситуаций в масштабе реального времени. Для уменьшения количества вычислений можно использовать модифицированный алгоритм «прямого хода» [2].

Следовательно, на данном этапе идентификации ситуации определяется текущая модель трафика информационного обмена. Однако для полного определения параметров трафика необходимо снять априорную неопределенность о состояниях S_i идентифицированному номеру j^* модели.

Далее решается подзадача восстановления текущих состояний объектов S_i , которая заключается в выборе такой последовательности состояний $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_T\}$ конечной длины T , которая с наибольшей вероятностью порождает наблюдаемую последовательность объектов

$O = \{o_1, o_2, \dots, o_T\}$ по заданной модели $\lambda_{j^*} = (A_{j^*}, B_{j^*}, \pi_{j^*})$. Другими словами, требуется определить «наилучшую» последовательность $Q^* = (q_1^*, q_2^*, \dots, q_T^*)$, максимизирующую вероятность $P(O, Q | \lambda_{j^*})$.

Эта подзадача решается на основе использования алгоритма Витерби (Viterbi Algorithm), являющегося вариантом метода динамического программирования [2, 3] для цепей Маркова.

На третьем этапе для исследуемого интервала T определяется плотность потоков заявок и время обслуживания заявок с учетом вида предоставляемой услуги для каждого узла спроса. Данная подзадача решается известными статистическими методами на основе формул Эрланга [5], исходя из предположения о том, что последовательность наблюдения $O = \{o_1, \dots, o_T\}$ является пуассоновской. Следует отметить, что третий этап по существу задает исходные данные для решения задачи управления радиоресурсами системы широкополосной радиосвязи.

Таким образом, общий алгоритм идентификации ситуаций можно изобразить в виде блок-схемы, которая приведена на рис. 1.

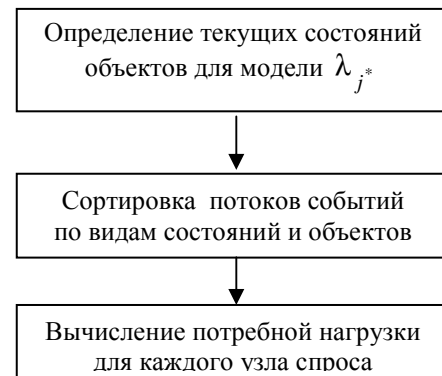


Рис. 1. Блок-схема алгоритма идентификации ситуаций

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ РАДИОРЕСУРСАМИ СИСТЕМЫ ШИРОКОПОЛОСНОЙ СВЯЗИ

Задача управления радиоресурсами системы широкополосной связи рассматривается как оптимизационная. Это позволит, с одной стороны, формализовать процедуру управления сетью, а с другой – учесть фактор поддержания среднего соотношения сигнал/шум во всем диапазоне частот широкополосных каналов.

Для получения относительно простых алгоритмов управления радиоресурсами системы связи предлагается известная транспортная задача, решаемая методом линейного программирования [4–6].

Рассмотрим математическую трактовку задачи распределения канального ресурса систем мобильной связи. Исходными данными являются:

N_k^{ful} – количество потребных каналов для обслуживания k -го узла спроса ($k = \overline{1, N}$), определяемое как сумма каналов по всем видам заявок (величины вычисляются с помощью алгоритмов идентификации ситуации);

N_l^{bs} – максимальное число разрешенных (допустимых) каналов для l -й базовой станции, при этом число базовых станций в системе равно L . Величина N_l^{bs} определяется типом используемого оборудования системы сотовой связи (известна оператору связи);

C_{kl} – условное среднее соотношение мощности сигнал/шум, приходящейся на один канал, из k -го узла спроса в l -тую базовую станцию. Значение величины C_{kl} определяется также тем, что узлы спроса «разбросаны» по всей обслуживаемой территории, могут иметь разную «географическую» и «топографическую» привязку, которая оказывает влияние на качество распространения радиосигналов, их помехоустойчивость, электромагнитную совместимость и т. д.

Обозначим через x_{kl} планируемое число каналов, которое будет использоваться l -й базовой станцией для обслуживания k -го узла спроса. Тогда в принятых обозначениях будем иметь, что

$$\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^L C_{kl} x_{kl} - \text{интегральные (суммарные)}$$

энергетические затраты в системе мобильной связи;

$$\sum_{l=1}^L x_{kl} - \text{общее количество каналов, необходимых}$$

для обслуживания k -го узла спроса;

$$\sum_{k=1}^N x_{kl} - \text{общее количество разрешенных каналов}$$

l -й базовой станции.

Естественным образом будем полагать, что должны выполняться условия:

$$\sum_{l=1}^L x_{kl} = N_k^{ful}, k = \overline{1, N}, \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^N x_{kl} \leq N_l^{bs}, l = \overline{1, L}, \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^N N_k^{ful} \leq \sum_{l=1}^L N_l^{bs}. \quad (5)$$

Итак, задачу распределения каналов между базовыми станциями можно сформулировать следующим образом: нужно найти аргументы x_{kl} , обеспечивающие минимум функционала J вида

$$J = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^L C_{kl} x_{kl} \quad (6)$$

при условиях (3–5) и $x_{kl} \geq 0$. Решение поставленной задачи может базироваться на методе последовательного улучшения плана – симплексного метода [6–8]. Необходимым дополнительным условием решения задачи является целочисленность значений искомых аргументов x_{kl} .

Далее, перебирая все возможные варианты конфигураций размещения базовых станций и повторяя вышеописанную методику канального распределения, можно получить множество значений критерия J . Дальнейшим естественным шагом будет выбор и назначение той конфигурации сети мобильной широкополосной связи, для которой значение критерия J (среди имеющегося множества) минимально.

Нетрудно видеть, что знание величин x_{kl} поможет также более точно определиться с количеством задействованных (активных) каналов для каждой базовой станции. И если получится так, что хотя бы для одной базовой станции $\sum_{k=1}^N x_{kl} < N_l^{bs}$, то это позволит в дальнейшем

минимизировать сложность алгоритмов канально-временного планирования, упростить алгоритмы эстафетной передачи, улучшить структуру сети, повысить скорость обработки информации и в целом повысить информационную емкость всей системы мобильной связи.

На данном этапе может проводиться процедура составления расписания во времени передачи данных между базовыми станциями с учетом уже известных нагрузок для каждого узла спроса, что позволит уменьшить величину коллизии в процессе внутрисистемной передачи данных.

ОЦЕНКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ РАДИОРЕСУРСАМИ РАДИОСИСТЕМЫ

Особенности оценки численного моделирования процесса управления (распределения) радиоресурсов системы широкополосной связи в том, что она проводилась по нескольким направлениям:

- оценка достоверности идентификации моделей наблюдения;
- анализ временных затрат на выполнение процедур управления радиоресурсами;
- общая оценка эффективности разработанных алгоритмов.

Численное моделирование алгоритмов «прямого хода» и Витерби идентификации и восстановления последовательности наблюдений осуществлялось на основе СММ, описанных выше. Априорно задавалось множество моделей $\Lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_r\}$ и их характеристики $\lambda_i = A_i, B_i, \pi_i$.

Краткая суть оценки достоверности идентификации моделей и восстановления последовательности наблюдения заключалась в определении частоты (вероятности) корректного обнаружения априорно известной модели по последовательности наблюдения $O = \{o_1, \dots, o_T\}$. При этом рассматривалось два варианта. В первом варианте учитывалось поэлементное совпадение параметров (o_i, q_i) входящего и восстановленного потока заявок в произвольный момент времени t_i .

Во втором варианте учитывалось общее количественное совпадение входящего и доопределенного потоков без поэлементной привязки в интервале наблюдений T .

Вероятность корректного обнаружения соответственно для первого P_1 и второго P_2 вариантов оценивалась относительно величины априорно известных состояний во входной последовательности, также в зависимости от характера неопределенности, т. е. характера распределения неизвестных данных (ошибок) во входной последовательности. При этом неопределенность была двух видов – с последовательным и распределенным характером ошибок во входном точечном процессе. Соответствующие результаты моделирования приведены на рис. 2.

Из анализа графиков на рис. 3 видно, что вероятность совпадений входной и восстановленной последовательностей несколько выше для второго варианта, в том числе и для последовательного характера ошибок.

Оценка временных затрат на выполнение процедуры управления радиоресурсами включала оценку влияния интервала наблюдений T на качество наблюдения и оценку общего быстродействия разработанных алгоритмов с учетом решения задачи оптимизации. Результаты анализа интервала наблюдения T приведены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что вероятность корректного восстановления наблюдаемой последова-

тельности падает при увеличении длины наблюдений. Этот факт объясняется эффектом накопления ошибок в процессе работы алгоритма Витерби, т. е. алгоритм Витерби критичен к так называемой «длине кодового ограничения», поэтому его использование можно ограничивать небольшими участками наблюдений, по окончании которых нужно снова возобновлять его работу.

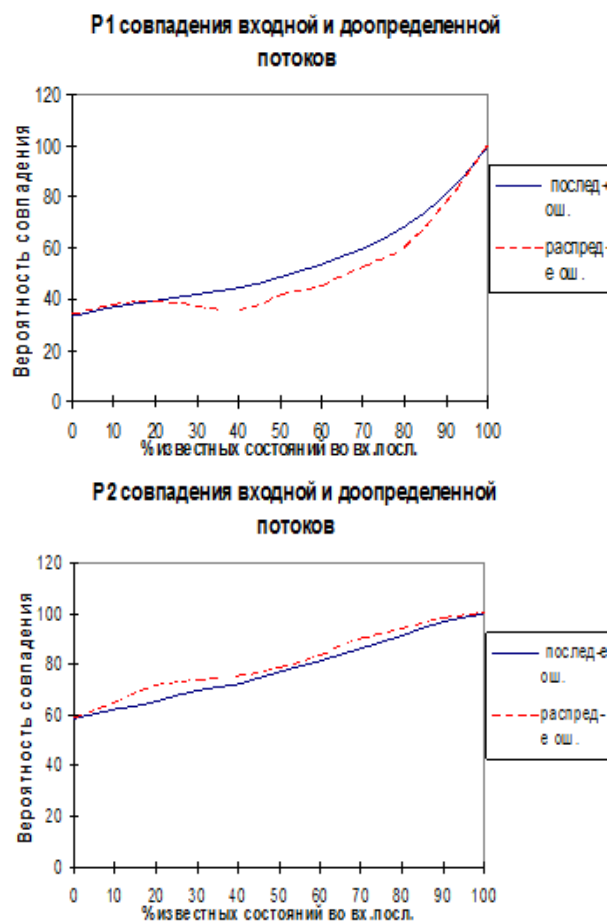


Рис. 2. Вероятности совпадений входной и восстановленной последовательности наблюдений в зависимости от их неопределенности

Общее время работы алгоритма управления радиоресурсами стандарта WiMax по г. Уфе составляет от 0,5 мин. (ночное время) до 15 мин. (в максимальный пик нагрузки), что является вполне допустимым для оператора сотовой связи ООО «Скартел».

На основе разработанных стохастических моделей ситуационно-адаптивного планирования выработаны рекомендации по модернизации конфигурации сети сотовой связи ООО «Скартел», которые позволят повысить энергетическое соотношение сигнал / шум на 12,7% при сохранении требуемого качества связи по виду услуг.

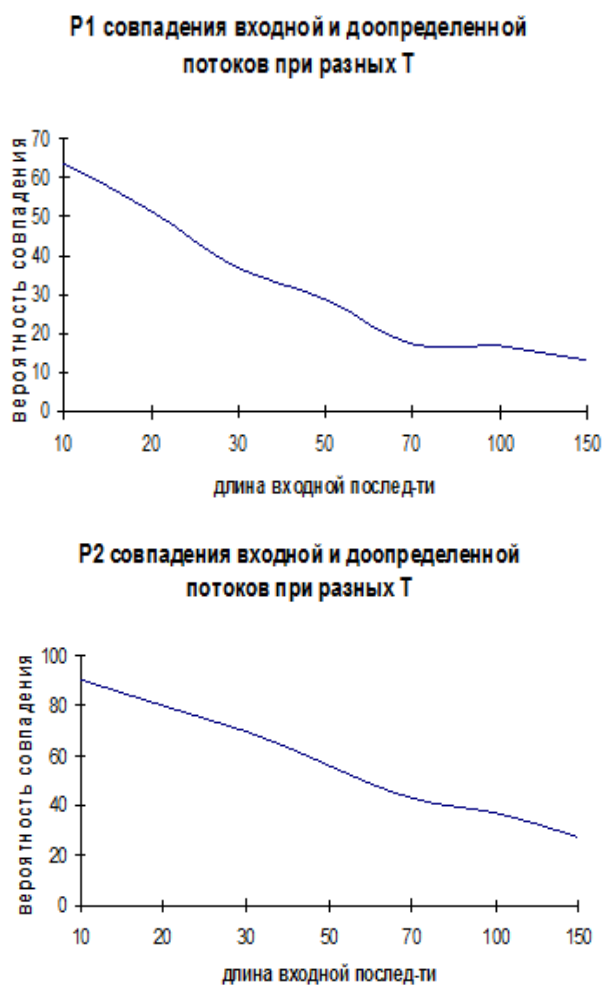


Рис. 3. Графики вероятности совпадений в зависимости от длины наблюдений

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет в целом восстановить неопределенные номера узлов спроса и провести дальнейшую более «тонкую настройку» конфигурации мобильной сети под реалии ее эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный алгоритм канально-временного ресурса в системах широкополосной связи позволяет наилучшим образом учесть потребности мобильных пользователей и повысить гибкость управления радиоресурсами системы в условиях неопределенности позиционирования мобильных станций. Интегральный энергетический выигрыш при использовании данного алгоритма может составить выше 12,7% .

Также хотелось бы также отметить необходимость восстановления отечественной школы по исследованию, разработке и производству средств массовых телекоммуникаций, что позволило бы развивать и обрабатывать в дальнейшем инновационные технологии без ограничений со стороны западных компаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фрактальные процессы в телекоммуникациях / О. И. Шелухин [и др.]. М.: Радиотехника, 2003. 480 с.
2. **Кузнецов И. В., Блохин В. В., Султанов А. Х.** Разработка алгоритмов вычисления текущей и ее распределения между базовыми станциями в системе мобильной связи в условиях неопределенности состояний наблюдений // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: Материалы 6-й международн. науч.-техн. конф. Уфа, 2005. С. 149–156.
3. www.spirit.ru/articles/asr.html.
4. **Евтушенко Ю. Г.** Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации. М.: Наука, 1982. 457 с.
5. **Карманов В. Г.** Математическое программирование. М.: Наука, 1986. 286 с.
6. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы. М.: Наука, 1984. 831 с.
7. **Финки Д.** Введение в теорию планирования экспериментов. М.: Наука, 1970. 287 с.
8. **Смит Д. М.** Математическое и цифровое моделирование для инженеров и исследователей. М.: Машиностроение. 1980. 271 с.

ОБ АВТОРАХ

Султанов Альберт Ханович, проф., зав. каф. телекоммуникац. систем. Дипл. инженер по многоканальн. электросвязи (Новосиб. электротехн. ин-т связи, 1973). Д-р техн. наук по упр. в техн. сист. (УГАТУ, 1996). Иссл. в обл. телеком. систем, опто-электр. аэрокосм. систем.

Кузнецов Игорь Васильевич, проф. той же каф. Дипл. инженер электронной техники. Д-р техн. наук (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. систем автоматического управления и телекоммуникац. систем.

Камалов Артур Эрнстович, канд. техн. наук. (УГАТУ, 2011). Дипл. инженер по средствам связи с подвижными объектами (УГАТУ, 2007).