

**Федеральное агентство связи**

**Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования**

**ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ**

**ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕЧНАЯ  
СИСТЕМА**

**Самара**

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Поволжский государственный университет  
телекоммуникаций и информатики»

На правах рукописи

Прошечкина Наталья Викторовна

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ  
ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ  
В СИСТЕМАХ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ**

Специальность 05.12.04 — Радиотехника,  
в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

САМАРА — 2009

Работа выполнена на кафедре радиоприемных устройств государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики" (ПГУТИ)

**Научный руководитель:**

доктор технических наук,  
профессор Анатолий Иванович Тяжев

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук,  
профессор Марк Абрамович Минкин  
кандидат технических наук,  
доцент Валерий Геннадьевич Шаталов

**Ведущая организация:**

**ГОУВПО «Самарский государственный технический университет»**

Защита состоится " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2009 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании совета Д219.003.01 в Поволжском государственном университете телекоммуникаций и информатики по адресу:  
443010, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПГУТИ.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д219.003.01,  
доктор физико-математических наук



О. В. Осипов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Развитие телекоммуникационных технологий предопределило внедрение систем связи с подвижными объектами (ССПО) во многие сферы деятельности человека. На основании действующего законодательства [Л1] ряду министерств и ведомств разрешено добывание информации из технических средств связи в процессе ведения оперативно-розыскных мероприятий (ОРМ).

Рост числа аварий и катастроф различного характера с тяжелыми последствиями - гибелью людей, потерями материальных ценностей, ухудшением экологической обстановки - сегодняшняя реальность. Эксперты Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) считают, что спасение человека, получившего травму, на 60-70% определяет то, как быстро ему оказана помощь. Возможность оперативного и точного местоопределения (МО) объекта могла бы упростить эту задачу.

Возрастание роли информации о местоположении источников радиоизлучений (ИРИ) в общем объеме задач управления радиочастотным спектром и получения оперативной информации подтверждают необходимость проведения анализа возможности использования существующих систем МО в данных условиях.

На данный момент разработано достаточно большое число систем позиционирования [Л2], однако все они требуют изменения и дооснащения как базовых станций (БС), так и мобильных станций (МС) и зачастую оказываются неприменимы для нужд ОРМ.

Имеется возможность реализации систем позиционирования, основанных на классических методах радиопеленгации – угломерном, дальномерном, разностно-дальномерном и т.д. Однако эти методы являются малоэффективными (имеют большую погрешность) в условиях плотной городской застройки. Поэтому актуальным остается вопрос исследования методов повышения точности местоопределения источников радиоизлучений в сетях мобильной связи.

**Целью диссертационной работы** является исследование возможных путей повышения точности МО в системах мобильной связи классическими методами радиопеленгации: угломерным и дальномерным в условиях воздействия многолучевости, а также минимизация погрешностей, обусловленных особенностями применяемых методов МО. В частности, предлагается повышать точность позиционирования за счет использования высокоподнятой приемной антенны. Под высокоподнятой антенной (ВПА) понимается антенная система, поднятая на высоту, много большую, чем высота городской застройки. Такую систему можно реализовать с помощью привязного аэростата, аэростата или высотного дирижабля. Погрешность определения азимутов при использовании угломерного метода МО предлагается уменьшать применением адаптивных сферических антенных решеток. Ошибку временной синхронизации при использовании

дальномерного метода предлагается оценивать и минимизировать с помощью фильтра Калмана.

**Основные задачи работы:**

- исследование и оценка точностных характеристик технологии МО с ВПА в городских условиях;
- исследование основных параметров системы с ВПА на основе аэростатной технологии;
- имитационное моделирование работы системы МО с ВПА в условиях плотной городской застройки;
- исследование возможных вариантов минимизации погрешностей, обусловленных особенностями применяемых методов МО;
- разработка структурной схемы системы МО с ВПА.

В работе использованы положения теории распространения радиоволн, математический аппарат теории вероятности и математической статистики, матричного анализа, аналитической геометрии, цифровой обработки сигналов, теории систем автоматического управления в пространстве состояний.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Предложен вариант построения системы МО ИРИ в сетях мобильной связи с высокой точностью позиционирования в условиях плотной городской застройки.
2. Получена цифровая реализация модели многолучевого распространения радиоволн системы GSM.
3. Обоснован выбор конструкции антенных систем и адаптивных алгоритмов обработки сигналов применительно к задаче МО угломерным методом позиционирования.
4. Предложен вариант повышения точности МО для дальномерного метода позиционирования с использованием фильтра Калмана.

**Обоснованность и достоверность** результатов подтверждается следующим:

- для оценки точностных характеристик системы МО с ВПА использованы известные статистические модели городской застройки, произведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными, полученными различными исследователями [ЛЗ];
- при разработке системы МО применялось имитационное моделирование и производилось сравнение отдельных результатов с данными, приведенными в литературе.

Основные научные результаты, выводы, а также алгоритмы и программы имитационного моделирования получены и сформулированы автором впервые и лично.

**Практическая ценность работы** заключается в следующем:

- предложенный вариант построения системы МО позволяет высокоточно определять местоположение источников радиоизлучений в условиях плотной городской застройки;
- разработанный автором программный продукт позволяет оценивать эффективность работы системы МО в реальных условиях на этапе ее проектирования;

- применение обоснованных адаптивных алгоритмов повышает точность МО при использовании угломерного и дальномерного методов позиционирования.

**Результаты диссертационной работы** в виде программного продукта и конкретных расчетных данных нашли применение в филиале ФГУП «Радиочастотный центр» Приволжского федерального округа, в электрорадионавигационной камере представительства ОАО «Волготанкер» в республике Татарстан для повышения точности навигационных и радиопеленгационных наблюдений, о чем свидетельствуют полученные акты о внедрении.

Отдельные результаты работы внедрены в учебный процесс по курсу «Системы позиционирования радиосредств» кафедры «Радиосвязи, радиовещания и телевидения» Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики.

**Апробация работы.** Основные результаты работы обсуждались на XIII Юбилейной Российской научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, г. Самара, 2006; VII Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций» г. Самара, 2006; XIV Российской научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, г. Самара, 2007; VIII Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», г. Уфа, 2007г., XV Российской научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, г. Самара, 2008г, XVI Российской научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, г. Самара, 2009 г.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 2 статьи в журнале «Инфокоммуникационные технологии», включенном в перечень ВАК, 2 статьи в журнале «Вестник СОНИИР», 2 тезиса докладов на международных научных конференциях, 6 тезисов докладов на российских научных конференциях и свидетельство об отраслевой регистрации электронного ресурса.

**Основные положения**, выносимые на защиту:

1. Построение системы МО ИРИ с ВПА, реализованной на основе аэростатной технологии, с высокой точностью позиционирования в условиях плотной городской застройки.

2. Результаты исследования характеристик системы МО с ВПА.

3. Пути повышения точности МО угломерным и дальномерным методами позиционирования.

4. Вариант построения структурной схемы системы МО с ВПА.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 71 наименования и 3 приложений, содержит 132 страницы текста, в том числе 37 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи исследования, показана новизна и практическая ценность работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

**В главе 1 «Обзор методов и систем определения местоположения радиосредств»** определена роль систем МО ИРИ диапазона УВЧ для нужд спасательных служб и проведения ОРМ органами спецслужб, проанализированы основные существующие методы позиционирования ИРИ, определены методы позиционирования, наиболее пригодные для нужд ОРМ. Выявлены особенности этих методов, влияющие на точность систем МО.

Большинство существующих предложений систем МО ИРИ на основе сотовых сетей базируется на трех конкурирующих технологиях [Л2]:

- технологии TOA (Time of Arrival), основанной на измерении и сравнении интервалов времени прохождения сигнала от мобильного телефона (МТ) абонента до нескольких БС;

- технологии OTD (Observed Time Difference), основанной на измерении и сравнении интервалов времени прохождения сигналов от нескольких БС до МТ абонента;

- технологии A-GPS (Assisted Global Positioning System), основанной на встраивании GPS-приемников в мобильные телефоны.

Существующие реализации технологий TOA и OTD не могут быть использованы для нужд ОРМ, т.к. при их использовании абонент ССПО сам инициирует функцию определения координат, что неприемлемо для поставленной задачи ОРМ.

При использовании технологий GPS, ГЛОНАСС и A-GPS основные достигаемые преимущества включают: достаточно высокую точность определений и глобальное покрытие. Однако при этом требуется модификация радиотелефона путем добавления в него приемников GPS или ГЛОНАСС и средств передачи координатной информации в сотовую сеть, а зона определения координат имеет ограничения, связанные с возможностью потери сигналов спутников в закрытых помещениях, низинах, центрах городов или под плотной листвой. Кроме этого, данный метод не применим к задачам ОРМ, т.к. приемник GPS или ГЛОНАСС в МС может отсутствовать.

В специализированных системах при определенном дооснащении базовых станций специальной аппаратурой может быть реализовано позиционирование абонентов сети, основанное на классических методах радиопеленгации – дальномерном, угломерном и т.д.

При применении дальномерного метода позиционирования ИРИ погрешность положения абонента относительно его истинного местонахождения  $\sigma_n$  (км) может быть рассчитана по формуле:

$$\sigma_n = \frac{4.2 \cdot 10^5 \sigma_r}{\sin \left[ \arccos \left( \frac{r_1^2 + r_2^2 - D_o^2}{2 \cdot r_1 r_2} \right) \right]},$$

где  $D_0$  (км) - расстояние между БС,  $\sigma_r$  (с) - известная ошибка измерения временных интервалов (одинаковая для каждой БС),  $r_1$  и  $r_2$  - рассчитанные дальности между МС и БС. Так, при расстоянии между БС 10 км и ошибке измерения временных интервалов  $\sigma_r = 10^{-1}$  погрешность местоположения составляет 43 метра, при  $\sigma_r = 10^{-1}$  – 427 метров, а при  $\sigma_r = 10^{-1}$  ошибка увеличивается до 4.2 км, что неприемлемо для современных систем МО.

Погрешность определения местоположения абонента относительно его истинного местонахождения  $\sigma_n$  (км) при известной величине расстояния  $D_0$  (км) между соседними БС, принявшими его сигнал, и измеренных углах  $\theta_1$  и  $\theta_2$  с ошибкой  $\sigma_o$  (град) составляет:

$$\sigma_n = \frac{1.7 \cdot 10^{-2} \cdot \sigma_o \cdot D_0 \sqrt{\sin^2 \theta_1 + \sin^2 \theta_2}}{\sin^2 (\theta_1 + \theta_2)}$$

Например, для расстояния между БС<sub>1</sub> и БС<sub>2</sub> равного 10 км следует, что при  $\sigma_o = 1$  погрешность пеленга достигает 170 метров, а при  $\sigma_o = 1$  погрешность МО увеличивается до 1,19 км.

Угломерный и дальномерный методы позволяют определять координаты подвижного абонента без вовлечения в процесс МО МС, что представляет возможным их использование для нужд ОРМ. Однако, для реализации указанных методов существуют проблемы практического характера:

- из-за эффекта многолучевого распространения радиоволн не всегда можно отличить прямой сигнал мобильной станции от переотраженных. Эта проблема является характерной для большинства технологий МО;

- точность определения направления прихода радиосигнала при угломерном методе прямо пропорциональна ширине ДН применяемой антенны, т.е. требуются адаптивные и интеллектуальные антенные решетки;

- точность МО при дальномерном методе пропорциональна ошибке временной синхронизации БС.

**В главе 2 «Исследование точностных характеристик систем МО источников радиоизлучений с высокоподнятой антенной»** рассматривается эффективность использования технологии МО с ВПА на основе приведенных доказательств повышения точности пеленгования, полученные результаты сравниваются с данными, полученными при имитационном моделировании.

Сложность условий распространения волн УВЧ диапазона определяет весьма приближенный характер построения математических моделей распространения радиоволн, подкрепляемых экспериментальными данными.

Для доказательства повышения точности позиционирования при использовании ВПА в стандарте GSM было проведено компьютерное моделирование многоотводного имитатора релеевских замираний. Структурная схема модели приведена в [Л4]. Моделировалось четыре отвода, в первом из которых использовался классический доплеровский спектр CLASS (рис.1), для всех остальных отводов использовался доплеровский спектр типа GAUS1 с разными временными задержками.



Классический доплеровский спектр CLASS может использоваться для трасс с задержками, не превышающими 500 нс и имеет вид:

$$S(f) = A/\sqrt{1 - (f/f_D)^2} \text{ для } f \in [-f_D, f_D],$$

где  $A(f_0, h_b, h_{ms}) = 69.55 + 26.16 \cdot \lg(f_0/f) - 13.82 \lg h_b/h_0 - a(h_{ms}/h_0)$ , (1)

- потери из формулы Окамуры,  $f_D = vf_0/c$  - доплеровский сдвиг частоты,  $f_0$  - несущая частота высокочастотного сигнала,  $f$  - текущая частота,  $h_b$  и  $h_{ms}$  - высоты подъема антенн базовой и мобильной станции соответственно,  $a(h_{ms}/h_0)$  - параметр,  $h_0$  - 1 м,  $f$  - МГц.

Доплеровский спектр GAUS1 представляет собой сумму двух функций, используется для значений дополнительной задержки, лежащих в диапазоне от 500 нс до 2 мкс и имеет вид:

$$S(f) = G(A; -0.8 f_D; 0.05 f_D) + G(A_1; -0.4 f_D; 0.1 f_D),$$

где  $G(f) = A \exp(-\frac{(f-f_1)^2}{2f_2^2})$  - гауссовская функция,  $A$  вычисляется по (1),  $A_1$  - на 10 дБ меньше  $A$ .

В рамках моделирования, согласно рис.1, было сформировано два канала белого гауссовского шума. Спектральное преобразование вида  $\frac{1}{\sqrt{f_d^2 - f^2}}$  и

фильтр нижних частот при моделировании были заменены последовательным соединением трехзвенного рекурсивного фильтра нижних частот второго порядка и дифференциатора первого порядка. Далее сигналы обоих каналов были умножены на (1). Оценка результатов проводилась с помощью спектрального анализа. Последовательность компьютерного моделирования и графические результаты подробно описаны в [8].

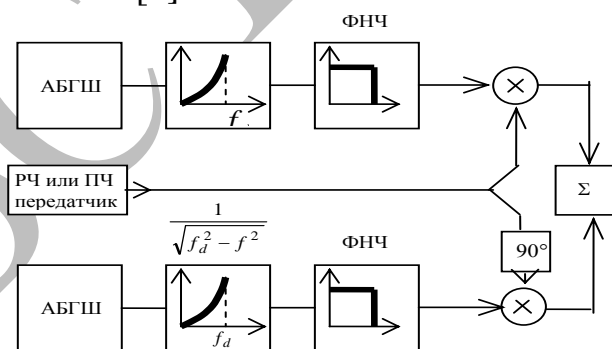


Рисунок 1- Структурная схема одного отвода имитатора релейских замираний

По результатам компьютерного эксперимента можно сделать вывод: «качество» принимаемого сигнала с подъемом приемной антенны на высоту до 300 м увеличивается на 54% (уменьшаются паразитные составляющие спектра, вызванные многолучевым распространением). Однако с подъемом антенны БС свыше 300 м «качество» сигнала ухудшается. Это вызвано ограничениями, связанными с применением эмпирической формулы (1).

Для систем позиционирования, основанных на угломерном методе определения координат, первичным определяемым параметром является угол прихода сигнала, дальномерном – скорость распространения сигнала. Точность данных методов существенно зависит от картины многолучевого распространения сигнала. Соответственно, при уменьшении эффекта многолучевости уменьшается погрешность МО указанными методами.

Для задачи моделирования и получения соотношений между точностью и высотой системы с ВПА можно применить положения из теории аналитической геометрии. Представим здания, которыми застроен городской район пересечением перпендикулярных друг другу плоскостей. Прямая пересечения этих плоскостей будет представлять собой крышу здания. Применительно для систем МО с ВПА требуется определить высоту ВПА, при которой между БС и МС имеется прямая видимость. Прямой радиолуч от МС можно представить прямой, соединяющей две точки МС и БС. Задача сводится к следующему: требуется составить уравнения двух прямых – прямой, имитирующей прямой радиолуч и прямой пересечения плоскостей зданий и определить совместное решение уравнений этих прямых. Изменяя высоту ВПА (изменяя положение первой прямой) и решая систему уравнений прямых можно определить высоту ВПА, при которой между БС и МС имеется прямая видимость. При этом прямая видимость будет иметь место, если эти прямые пересекаются.

Для адекватности модели необходимо также рассмотреть явление дифракции, возникающее в условиях плотной городской застройки. Препятствия, встречающиеся на пути распространения радиосигнала, представляются в виде непрозрачных клиновидных экранов, что позволяет для нахождения поля в точке приема применять методы расчета дифракционного поля физической оптики [15].

Согласно теории оптической дифракции, множитель ослабления по отношению к свободному пространству вычисляется по формуле

$$F(u) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \left( \frac{1}{2} - \int_0^u \cos \frac{\pi}{2} u^2 du \right) - j \left( \frac{1}{2} - \int_0^u \sin \frac{\pi}{2} u^2 du \right) \right], \quad (2)$$

где  $\left( \frac{1}{2} - \int_0^u \cos \frac{\pi}{2} u^2 du \right) = C(u)$ ,  $\left( \frac{1}{2} - \int_0^u \sin \frac{\pi}{2} u^2 du \right) = S(u)$  - интегралы Френеля. Параметр  $u$  имеет значение

$$u = \frac{h\sqrt{2}}{b},$$

где  $h = H - h_2$  - высота экранирующего препятствия,  $b$  - радиус первой зоны Френеля в месте расположения препятствия:

$$b = \sqrt{\frac{d_1 d_2 \lambda}{d_1 + d_2}},$$

$d_1$  и  $d_2$  - расстояния от МС до экранирующего препятствия и от БС до экранирующего препятствия соответственно. Местоположение первой зоны Френеля (точнее, половины первой зоны) указывает на область поверхности земли, в которой главным образом формируется отраженный луч.

В п. 2.5 рассмотрена «четырёхлучевая» теория дифракции у клиновидного препятствия. В этом случае дифракционный множитель имеет вид:

$$F = \left| \begin{array}{l} D_1 e^{i\gamma_1} + D_2 R_1 e^{i(\gamma_2 - \psi_1 - \theta_1)} + \\ + D_3 R_2 e^{i(\gamma_3 - \psi_2 - \theta_2)} + D_4 R_1 R_2 e^{i(\gamma_4 - \psi_1 - \psi_2 - \theta_1 - \theta_2)} \end{array} \right|, \quad (3)$$

где  $D_n e^{i\gamma_n}$  ( $n = 1 \dots 4$ ) – значения дифракционных множителей определяемых по (2) для каждого из четырех интерферирующих лучей,  $R_1 e^{i\theta_1}$ ,  $R_2 e^{i\theta_2}$  – комплексные коэффициенты отражения на участках передающая антенна – экран и экран - приемная антенна соответственно,  $\psi_1$  и  $\psi_2$  – фазовые сдвиги между отраженным и прямым лучами, вызванные разностью хода лучей.

На рисунке 2 представлена рассчитанная по (3) зависимость функции ослабления от высоты антенны БС для одного из положений МС в городской районе, приведенном на рисунке 3.

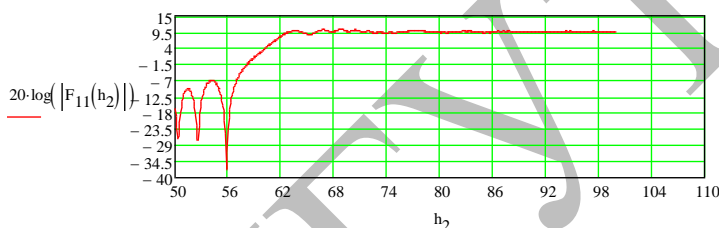


Рисунок 2 - Зависимость дифракционного множителя от высоты антенны БС

Для имитации работы системы МО с ВПА была разработана программа в среде Visual Basic. Программа реализует часть функций системы МО: определяет координаты МС или ИРИ угломерным методом, определяет наименьшую высоту, при которой между приемным и передающим пунктом обеспечивается прямая видимость, позволяет изменять положение БС для определения оптимального их расположения. На начальном этапе был смоделирован городской район, плотно застроенный разноэтажными зданиями, имитирующий оцифрованную карту реальной местности. На карте выбрано месторасположение БС, а по улицам движется точка, имитирующая движение МС. На рисунке 6 представлено главное окно программы. Графики, расположенные в главном окне, отражают в реальном масштабе времени расстояние от подвижной МС до БС (по оси абсцисс отложено расстояние в относительных единицах, а по оси ординат – высота подъема антенн БС). В виде вертикальных отрезков на этом графике представлены здания, встречающиеся на пути распространения радиолуча. Одновременно программой вычисляется величина дифракционного множителя при дифракции радиосигнала на кромке металлической крыши (3), определяется высота подъема антенны БС, при которой значение дифракционного множителя не меньше его значения в свободном пространстве.

Программа позволяет определить оптимальную высоту неподвижной антенной системы, системы пеленга с ВПА, определить оптимальное местоположе-

ние БС для данного городского района, а также получить и обработать статистические данные этих величин.

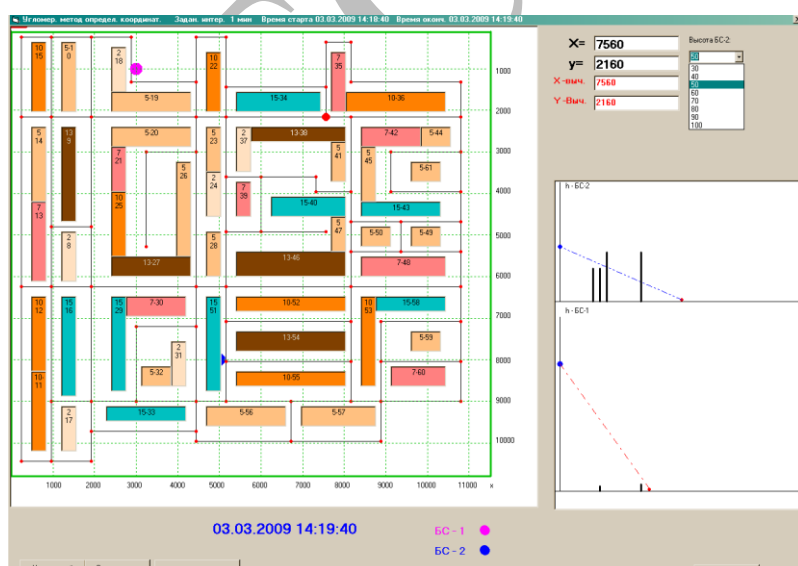
Для городского района, представленного на рисунке 3, средняя плотность застройки  $\nu = 54 \text{ км}^{-2}$ , среднее значение длины зданий  $\langle L \rangle = 170 \text{ м}$ . По результатам имитационного моделирования необходимая высота подъема ВПА получилась равной 500 метрам, т.е. при такой высоте подъема ВПА во всех точках местонахождения МС всегда существует прямая видимость. При этом вероятность прямой видимости, рассчитанная на основе статистических моделей для данной высоты приблизительно равна 0.75.

Поскольку при моделировании не учитывалось прохождение части энергии через здания, дифракционные эффекты высших порядков и т.д., найденные значения высот следует характеризовать как приближенные (расчет на этапе проектирования системы, определение ее оптимального местоположения, расчет выигрыша по точности разрабатываемой системы и т.д.), хотя учет всех этих эффектов в принципе может быть осуществлен ценой соответствующего усложнения аппарата.

Данная программа зарегистрирована в отраслевом фонде алгоритмов и программ [13] и легла в основу лабораторной работы по курсу «Системы позиционирования радиосредств».

В п.2.7 рассчитаны основные технические характеристики системы с ВПА на основе аэростатной технологии: массогабаритные характеристики, зона статического равновесия и время, требуемое для подъема системы на эту высоту; рассматривается влияние ветровых нагрузок на систему и разрабатывается алгоритм корректировки пеленга из-за смещения координат аэростата.

Из результатов вычислений следует, что аэростатная система МО может быть как статической (постоянно находиться на высоте), так и динамической (опускаться на причальную площадку), в случае необходимости на ее подъем не требуется большое количество времени и система будет достаточно оперативной.



тивной.

Рисунок 3 – Главное окно программы работы системы МО с ВПА

Под влиянием ветра изменяются координаты аэростата, что может явиться причиной больших погрешностей пеленга при использовании систем позиционирования с ВПА. Если не учитывать

смещение аэростата под влиянием ветровых нагрузок, то в ряде случаев применение аэростата может быть вообще нецелесообразным. Определить собствен-

ные пространственные координаты аэростата можно путем оснащения системы с ВПА приемником GPS.

В главе 3 «Исследование вопросов повышения точности угломерного и дальномерного методов позиционирования» исследуются вопросы уменьшения погрешностей пеленга за счет конструктивных ошибок применяемых методов.

Погрешность определения азимута направления прихода сигнала, а, следовательно, и определения местоположения МС угломерной системой МО с ВПА, зависит от вида применяемой антенной системы. Перечислим основные требования, должна обладать приемная антенная система для системы МО с ВПА:

- возможность широкоугольного (до 360°) сканирования лучом неизменных ширины и формы в азимутальной плоскости;
- слабая по сравнению с плоскими и линейными антенными решетками взаимная связь излучателей из-за пространственного разворота их осей;
- возможность формирования узкой диаграммы направленности.

Таковыми качествами обладает сферическая антенная решетка (САР). Построение САР позволяет использовать поверхность аэростата для уменьшения мас-

согабаритных характеристик последнего (новые разработки в сфере нанотехнологий позволяют использовать технологию напыления (металлизации) элементов АР на оболочку аэростата). Кроме того, геометрическая форма АР в виде сферы позволяет осуществлять сканирование в любом направлении, а цифровая обработка сигнала в АР позволяет осуществлять формирование нескольких независимых лучей диаграмм направленности в различных плос-

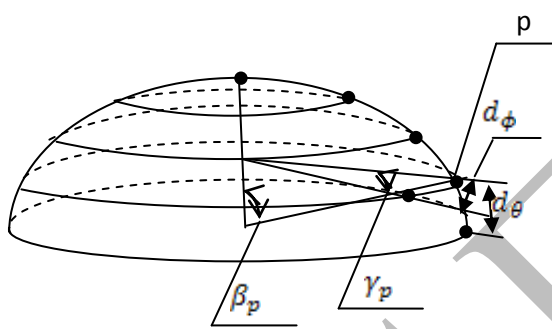


Рисунок 4 – Сферическая АР

костях.

На рис. 4 схематично представлена сферическая антенная решетка с эквидистантным размещением элементов по параллелям.

Диаграмму направленности САР можно записать в виде:

$$f(\theta, \phi) = \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^{n_p} A_p e^{j(\Phi + \Phi_s)}, \quad (4)$$

где  $\Phi$  – фазовый сдвиг из-за разности хода лучей,  $\Phi_s$  – фаза возбуждения излучателей, обеспечивающая сложение полей  $\theta, \phi$ ,  $A_p = \cos(\beta_p)$  – амплитуда возбуждения излучателей -го кольца,

$$M = \pi R / 2d_\theta + 1 \quad (5)$$

– число колец на сфере,

$$n_p = 2\pi R \sin\left(\frac{(p-1)d_\theta}{R}\right) / d_\phi \quad (6)$$

- число излучателей на -м кольце.

Фазовый сдвиг из-за разности хода лучей определяется по формуле:

$$\Phi = kR(\sin\theta \sin\beta_p \cos(\phi - \gamma_p q) + \cos\theta \cos\beta_p),$$

где  $\beta_p = (p - 1) d_\theta / R$ ,  $\gamma_p = 2\pi / n_p$ .

Фаза возбуждения  $q$ -го излучателя  $p$ -го кольца:

$$\Phi_s = -kR(\sin\theta_s \sin\beta_p \cos(\phi_s - \gamma_p q) + \cos\theta_s \cos\beta_p).$$

На рисунке 5 приведена диаграмма направленности, рассчитанная для сферической решетки с числом элементов равным 263 (данное количество элементов было выбрано согласно расчетам по (5), (6)). Излучатели располагались на поверхности сферы в вершинах почти одинаковых треугольников. Симметрия структуры боковых лепестков определяется симметрией расположения излучателей решетки относительно оси диаграммы.

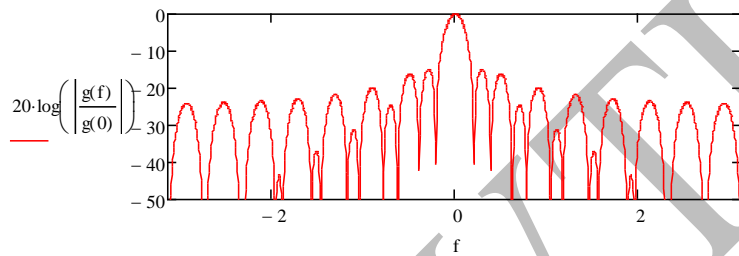


Рисунок 5 - Диаграмма направленности сферической решетки

В п. 3.2. рассмотрено многоканальное адаптивное устройство формирования диаграммы направленности и выполнено его компьютерное моделирование. Данное устройство основано на алгоритме максимального правдоподобия [Л6] и позволяет получить более узкий луч диаграммы направленности в направлении источника радиоизлучений.

На рисунке 6 приведена диаграмма направленности сферической антенной решетки, полученной с применением адаптивного устройства формирования лучей.

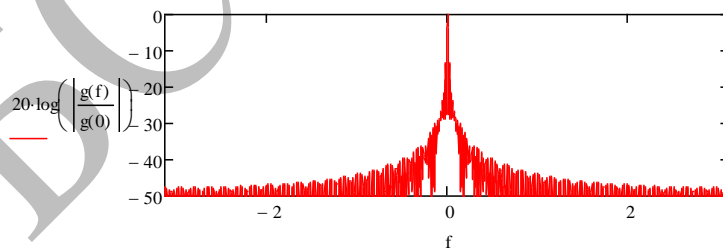


Рисунок 6 –Диаграмма направленности сферической антенной решетки с адаптивным формированием лучей

Согласно полученным расчетам, ширина главного лепестка диаграммы направленности сферической антенной решетки при применении адаптивного устройства формирования лучей уменьшается в 6 раз.

Только наличие жесткой синхронизации БС делает целесообразным применение для МО дальномерного метода определения координат. Наиболее точно временную синхронизацию можно обеспечить с помощью спутниковых навигационных систем GPS или ГЛОНАСС. Однако в спутниковых системах также возможно возникновение ошибок (хоть и не значительных) в ходе атомных ча-

сов и орбитах спутников, представляющих собой некоррелированный во времени стохастический процесс. Оценка и минимизация ошибок данного типа носит к задаче стохастической фильтрации, которая может быть решена с использованием фильтра Калмана [Л7]. На рис. 7 представлены результаты моделирования фильтра Калмана в среде Mathcad. Ошибка синхронизации при делении представлена белым гауссовским шумом. Результаты вания показывают, что фильтр Калмана уменьшает ошибку синхронизации в 4.47 раза.

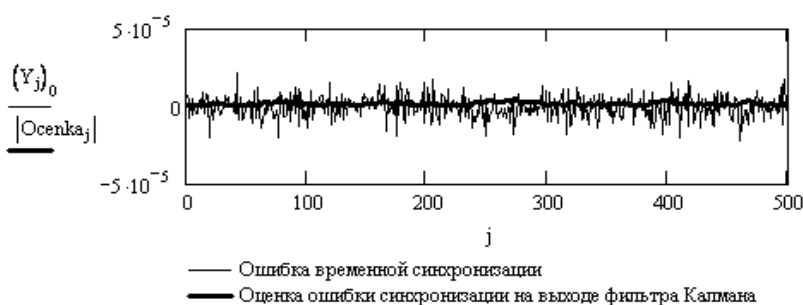


Рисунок 7 – Моделирование процесса фильтрации ошибки временной синхронизации фильтром Калмана

В главе 4 «**Построение системы МО с ВПА**» рассматривается структурная схема и алгоритм работы системы МО с ВПА при использовании угломерного метода определения координат.

Система МО с ВПА состоит из аэростатного комплекса и диспетчерского пункта. Обмен и передача данных между составными частями системы обеспечивается службами сети GSM.

Аэростатный комплекс состоит из антенной системы для определения первичных параметров сигнала позиционирования, двух сканирующих приемников для приема и обработки сигналов с антенной системы, терминального модуля, осуществляющего взаимодействие всех элементов аэростатного комплекса и содержащего приемник GPS для определения собственных координат и комплекта источников питания: действующих и резервных.

Обобщенная функциональная схема терминального модуля представлена на рисунке 8.

Под воздействием ветра и других метеорологических явлений система позиционирования ИРИ с ВПА, закрепленная на одном тросе будет хаотично поворачиваться вокруг своей оси. Это явление затрудняет, а порой делает невозможным, определение места положения ИРИ угломерным методом. Данную проблему можно решить, используя современные разработки с области беспроводных высокоскоростных сетей.

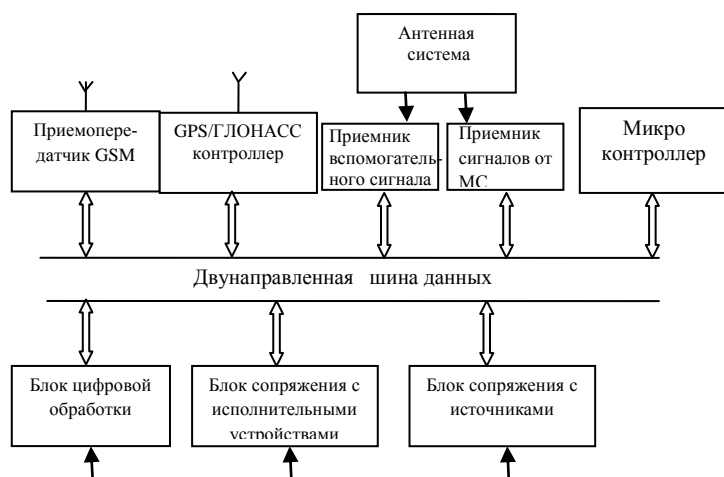


Рисунок 8 - Обобщенная функциональная схема терминального модуля

А так как местоположение его стационарно и координаты его известны, ведущая БС, таким образом, имеет возможность подстроить пеленгационные данные, приходящие от ИРИ. Т.е., в определенный момент времени на антенную систему приходят два нужных нам сигнала: один – сигнал вспомогательных БС, требуемый для уточнения направления прихода сигнала, другой – от пеленгуемого источника ИРИ. Точно зная направление прихода первого сигнала, система может оценить пространственное направление второго. Для этого в СМО с ВПА предусмотрено два приемника: один для приема и обработки вспомогательного сигнала, другой – для получения и обработки сигнала от МС.

БС, оснащенную системой с ВПА назовем ведущей, все остальные БС – вспомогательными. Современные беспроводные сетевые радиисточники, такие как Bluetooth, точки доступа, сами БС и т.д. используют протоколы, подразумевающие наличие уникального идентификатора. Данные устройства имеют в своем составе передатчик, который может регулярно посылать служебные кадры. Наличие индивидуального идентификационного номера передатчика позволяет однозначно определить его.



## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена вариант построения системы МО ИРИ и доказано повышение точности МО ИРИ системы с ВПА на основе модели распространения сигнала, стандартизированной в системах GSM, проведено имитационное моделирование, подтверждающее эффективность системы МО с ВПА.
2. Проведен анализ и выбраны оптимальные методы позиционирования для нужд служб, осуществляющих ОРМ.
3. Исследованы основные характеристики системы МО с ВПА (размер аэростата, время, затрачиваемое на подъем системы, высота подъема системы), исследовано влияние ветровых нагрузок на систему с ВПА и предложен алгоритм и программа корректировки пеленга из-за смещения системы под действием ветра.
4. Предложены возможные пути повышения точности МО угломерного и дальномерного методов.
5. Разработана структурная схема системы МО ИРИ с ВПА.

## ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Прошечкина Н. В. Оценка точности пеленга за счет подъема приемной антенны [Текст] / Прошечкина Н. В., Тяжев А. И.// Инфокоммуникационные технологии. – 2006 . - №4 – С.48-51.
2. Прошечкина Н. В. Построение модели местоопределения абонента методом Монте-Карло [Текст] / Прошечкина Н. В., Тяжев А. И.// Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: тез.докладов VII МНТК, 2006г., г. Самара. – Самара, 2006. – С. 247-248.
3. Прошечкина Н. В. Методы повышения точности позиционирования мобильных телефонов и уменьшения технических затрат [Текст]/ Прошечкина Н. В.//XIII юбил. рос. науч. конф. ППС, науч. сотрудников и аспирантов: тез. докладов , 2006 г., г. Самара. – Самара,2006. – С. 103-104
4. Прошечкина Н. В. Влияние ветровой нагрузки на поднятую аэростатом [Текст] / Прошечкина Н. В.// Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: тез.докладов VIII МНТК, 2007г., г.Уфа. – Уфа, 2007. – С.182-184.
5. Прошечкина Н. В. Особенности моделирования в радиолокации [Текст]/ Прошечкина Н. В., Тяжев А. И.// XVI рос. науч. конф. ППС, науч. сотрудников и аспирантов: тез. докладов , 2007 г., г. Самара. – Самара, 2007. – С. 84-85.
6. Прошечкина Н. В. Влияние ветра на координаты высоко поднятой с помощью аэростата антенны [Текст]/ Тяжев А. И., Прошечкина Н. В.// XVI рос. науч. конф. ППС, науч. сотрудников и аспирантов: тез. докладов , 2007 г., г. Самара. – Самара, 2007. – С. 84-85.
7. Прошечкина Н. В. Исследование аэродинамических характеристик системы позиционирования мобильных радиосредств с высокоподнятой антенной [Текст] / Прошечкина Н. В. // Вестник СОНИИР. – 2008. - №4(22). – С.85-90.
8. Прошечкина Н. В. Повышение точности позиционирования мобильных радиосредств за счет использования высокоподнятой антенны [Текст] / Прошечкина Н. В.// Инфокоммуникационные технологии. – 2008 . - №4 – С.78-80
9. Прошечкина Н. В. Влияние метеорологических характеристик на точность пеленга в системе позиционирования с высокоподнятой антенной [Текст]/ Прошечкина Н. В., Тяжев А. И.// XVII рос. науч. конф. ППС, науч. сотрудников и аспирантов: тез. докладов , 2008 г., г. Самара. – Самара, 2008. – С. 137-138.
10. Прошечкина Н. В. Задача о случайных блужданиях и ее применение в мобильном позиционировании [Текст]/ Прошечкина Н. В.// XVII рос. науч. конф. ППС, науч. сотрудников и аспирантов: тез. докладов , 2008 г., г. Самара. – Самара, 2008. – С. 137-138.
11. Прошечкина Н. В. Система корректировки пеленга радиосредств [Текст]/ Прошечкина Н. В.// XVIII рос. науч. конф. ППС, науч. сотрудников и аспирантов: тез. докладов , 2009 г., г. Самара. – Самара, 2009. – С. 137-138.
12. Прошечкина Н. В. Оценка точностных характеристик системы позиционирования с высокоподнятой антенной [Текст] / Прошечкина Н. В. // Вестник СОНИИР. – 2009. - №1(23). – С.85-90.
13. Прошечкина Н. В. Исследование угломерного метода определения местоположения подвижного объекта в реальных городских условиях// Свидетельство об отраслевой регистрации электронного ресурса № 00157.

## СПИСОК ЦИТИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

Л1. Закон об оперативно-розыскной деятельности в Российской Федерации [Текст] // Криминальный вестник Санкт-Петербурга. – 1992. - №8. – С. 4-5.

Л2. Громаков Ю.А. Технологии определения местоположения в GSM и UMTS [Текст] / Громаков Ю. А., Северин А. В., Шевцов В. А. – М.: Эко-Трендз. – 2005. – 144 с.

Л3. Пономарев Л. И. Распространение УКВ в городе [Текст] / Пономарев Л. И., Куликов А. М., Тельпуховский Е. Д.. – Томск: МП «Раско». – 1991. – 217 с.

Л4. Феер К. Беспроводная цифровая связью методы модуляции и расширения спектра [Текст] / Пер. с англ. Под ред. Журавлева В. И. - М. – Радио и связь - 2000. – 520 с.

Л5. Черный Ф. Б. Распространение радиоволн [Текст]/Черный Ф. Б. – М.: Изд-во “Советское радио”. – 1962. – 480 с.

Л6. Уидроу Б., Стиринз С. Адаптивная обработка сигналов [Текст]/ Пер. с англ.. – М.: Радио и связь. – 1989. – 440 с.

Л7. Браммер К. Фильтр Калмана-Бьюси: детерминированное наблюдение и стохастическая фильтрация [Текст] / Пер. с нем. Под ред. Казакова И. Е. – М. – “Наука”. – 1982 с.