

На правах рукописи

СУХОТИН Виталий Владимирович

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ СИГНАЛОВ В
СИСТЕМАХ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ**

**Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства
радионавигации, радиолокации и телевидения**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Красноярск – 2003

Работа выполнена в Красноярском государственном техническом университете

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Панько Сергей Петрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Сомов Виктор Григорьевич,
кандидат технических наук, доцент
Черников Дмитрий Юрьевич

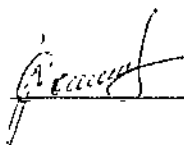
Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие
«Научно-производственное предприятие «Радиосвязь»,
г. Красноярск

Защита состоится « 4 » декабря 2003 г. в 16:00 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.098.02 при Красноярском государственном техническом университете по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. акад. Киренского, 26, ауд. Б - 121

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Красноярского государственного технического университета.

Автореферат разослан « 30 » октября 2003 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.098.02
кандидат технических наук,
доцент



Ю.П. Саломатов

2003-А
17326

ОБЩАЯ ХАРКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

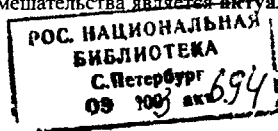
Актуальность проблемы. Системы передачи информации с использованием Искусственных Спутников Земли (ИСЗ) получили широкое распространение во многих странах в государственных, гражданских и пр. приложениях. В основном, в таких системах передается речевой трафик в режиме один канал на несущую с уплотнением или без него. В последнее десятилетие спутниковые коммуникации все в большей степени используются в качестве сегмента компьютерных сетей в виде интегрированной структуры передачи компьютерных данных и речевых сообщений при различных методах распределения ресурса.

В простейшем варианте телекоммуникационная система содержит одну или несколько Земных Станций (ЗС) и активный ретранслятор, расположенный на борту ИСЗ. Наиболее распространены системы связи с использованием геостационарных или низкоорбитальных ИСЗ.

Спутниковые системы связи охватывают значительные по площади территории. Например, сигнал ретранслятора, работающего в диапазоне С и размещенного на борту ИСЗ, зафиксированного на геостационарной орбите (ГСО) в точке стояния 103 град. вост. долготы, покрывает территорию от Москвы до Камчатки и от Таймыра до Бомбея, включая всю Юго-Восточную Азию и Японию.

При анализе и расчете помехоустойчивости таких систем обычно исходят из условия наличия естественных шумовых составляющих в виде белого широкополосного Гауссова шума с равномерной спектральной плотностью в пределах полосы пропускания радиочастотного тракта. Борьба с умышленными помехами в системах спутниковой связи в широкодоступной литературе не рассматривается.

Аппаратура ЗС и ретранслятора коммуникационных широковещательных ИСЗ не содержит средств борьбы с умышленными помехами. Эта проблема является классической для наземных средств связи - как с точки зрения радиоразведки, так и радиопротиводействия. Для них отработаны методы и технологии, разработаны и выпускаются серийно специальные средства, ведется регулярная работа, создана система подготовки специалистов. Совершенно по иному обстоят дела в спутниковых коммуникациях. Постановщик помехи, которой в данном случае является сигнал нелегитимного пользователя («пирата»), может располагаться в любой точке участка поверхности Земли, в пределах зоны радиовидимости ИСЗ. Отсюда следует, что проблема определения координат постановщика помех, как самостоятельная часть основной проблемы защиты спутниковых коммуникациях от постороннего вмешательства является актуальной.



Борьба с несанкционированным вмешательством состоит в определении координат неизвестного передатчика для предъявления различного рода санкций, и/или создании условий, обеспечивающих невозможность работы пиратов. Для большей общности научных исследований, в диссертации рассмотрено определение координат источников сигналов (ИС), а не только неизвестного передатчика.

Целью работы является исследование и разработка методов определения координат ИС в системах связи с ИСЗ, расположенном на геостационарной орбите.

Данная цель достигается решением следующих задач:

1. Разработка основ Доплеровского и фазового метода определения координат ИС с размещением и без размещения на борту ИСЗ антенной решетки.
2. Анализ источников погрешностей, оценка и сопоставление точностных характеристик разработанных методов определения координат ИС в системах спутниковой связи.

Методы исследований. При решении поставленных задач использованы основы общей теории фазовой радиопеленгации, элементы аналитической геометрии, элементы линейной алгебры, статистическая теория погрешностей измерения, основные законы движения ИСЗ.

На защиту выносятся.

1. Фазовая методика определения координат ИС при размещении антенной решетки на борту ИСЗ на ГСО.
2. Доплеровская и фазовая методики определения координат ИС, основанные на эволюции положения ИСЗ на ГСО в пределах суточной траектории.
3. Применение фазовой методики определения координат ИС для существующих поколений коммуникационных ИСЗ на ГСО возможно только с использованием виртуальной антенной решетки (ВАР).
4. Методические и статистические характеристики погрешностей определения координат ИС зависят от расположения ИС относительно подспутниковой точки.

Научная новизна.

1. Разработаны и обоснованы методики определения координат ИС с использованием одного ИСЗ на ГСО.
2. Основы общей теории фазовой радиопеленгации распространены на случай виртуальной антенной решетки.
3. Предложено и обосновано использование участков траектории с одинаковой скоростью, возмущенного движения ИСЗ на ГСО, но различным направлением движения для увеличения точности определения координат ИС.

4. Обосновано исключение влияния медленно меняющейся переменной составляющей фазы сигнала, вызванной движением ИСЗ на ГСО, в пределах измерительного цикла.

Практическая и научная ценность диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработанная фазовая методика с антенной решёткой на борту ИСЗ на ГСО позволяет определять координаты ИС с высокой точностью, используя один ИСЗ на ГСО.

2. Разработанные Доплеровская методика и фазовая методика с ВАР позволяют определять координаты ИС без доработки бортовой аппаратуры ИСЗ на ГСО.

3. Исключение медленно меняющейся переменной составляющей фазовой компоненты сигнала ИС за измерительное время позволяет повысить точность определения координат ИС.

4. Установленная зависимость погрешностей определения координат ИС от его расположения относительно подспутниковой точки позволяет корректировать результаты измерений для повышения точности определения координат ИС.

Использование результатов диссертации. Результаты диссертационной работы внедрены на Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь», в Конструкторском бюро «Искра», а так же в учебном процессе на кафедре «Радиосистем» КГТУ, что подтверждено соответствующими актами о внедрении.

Личный вклад автора. Выносимые на защиту результаты работы получены автором лично. В работах, опубликованных в соавторстве, автором предложены методические основы, проведены аналитические выкладки и получены расчетные значения.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на следующих научно-технических конференциях и семинарах: Материалы всероссийских научно-технических конференций молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники», посвященной 103-й, 104, 105 и 106 годовщинам Дня Радио, Красноярск, май 1998 г., май 1999 г., май 2000 г. май 2001 г.; Материалы Международной конференции «Информационные системы и технологии». Новосибирск, ноябрь 2000 г.; 19th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, Toulouse, April 2001 г.; Всероссийская дистанционная научно-техническая конференция молодых ученых и студентов "Современные проблемы радиоэлектроники", посвященная 107-й годовщине Дня Радио, Красноярск, май 2002 г.; Материалы VIII международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC*2002), Воронеж, апрель 2002 г.; Материалы VI всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Решетневские чтения". Красноярск, ноябрь 2002 г.; Материалы 9 международной научно-технической конференции студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, Электротехника и Энергетика". Москва, март 2003 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 15 печатных работ, из них 1 патент РФ и 2 положительных решения по заявкам на выдачу патента РФ, 1 в реферируемом журнале.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Работа содержит 132 страницы текста. Список литературы включает 88 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит общую характеристику проблемы и актуальности выбранной темы. Формулируются цели и задачи исследования, научная новизна и положения представляемые к защите, теоретическая и практическая ценность, приводится краткое содержание работы.

Первая глава посвящена аналитическому обзору состояния проблемы.

Проблема несанкционированного захвата ресурса Бортового Ретранслятора (БР), является предметом исследований, проводимых во многих странах.

Анализ научно-технических и патентных публикаций позволил определить перечень стран и глубину интереса исследователей к проблеме.

На основании анализа, а также материалов разработанных в диссертации разработана классификация методов определения координат (рисунок 1).

Как видно из классификации, определение координат ИС возможно по двум основным направлениям: с использованием одного ИСЗ или группировки ИСЗ. С использованием одного ИСЗ методы и устройства позволяют определить координаты с антенной решёткой на борту ИСЗ как с извлечением измерительной информации на ИСЗ, так и с извлечением измерительной информации на Мониторинговой Земной Станции (МЗС), а без антенной решетки на борту ИСЗ только с извлечением измерительной информации на МЗС. К извлечённой информации относится: время задержки, Доплеровское смещение частоты, фазовый сдвиг, распределение мощности, интеграл от Доплеровского смещения частоты сигнала и векторы электромагнитного поля. Методы и устройства определения координат ИС с использованием группировки ИСЗ с извлечением измерительной информации только на МЗС также как и в первом направлении позволяют определить координаты ИС. К извлечённой информации относится: время задержки, Доплеровское смещение частоты, фазовый сдвиг, распределение мощности, интеграл от Доплеровского смещения частоты сигнала и векторы электромагнитного поля.

Одной из первых работ, посвященных определению координат ИС в системе спутниковой связи, является патент США от 1991 г. В системе использованы два ИСЗ, близко расположенные на геостационарной орбите. Источник сигнала излучает сигнал по основному лепестку диаграммы направленности в сторону первого ИСЗ, а по боковому – в сторону второго ИСЗ. В качестве источников для определения координат используются два параметра - различие по времени прихода сигналов (DT) и по Доплеровскому сдвигу частоты (DF), вызванный движением ИСЗ. На поверхности Земли могут быть построены: Доплеровская изолиния - линия постоянства значения Доплеровского смещения частоты для каждого ИСЗ и линия постоянства различия по времени прихода сигналов для каждого ИСЗ (рисунок 2).

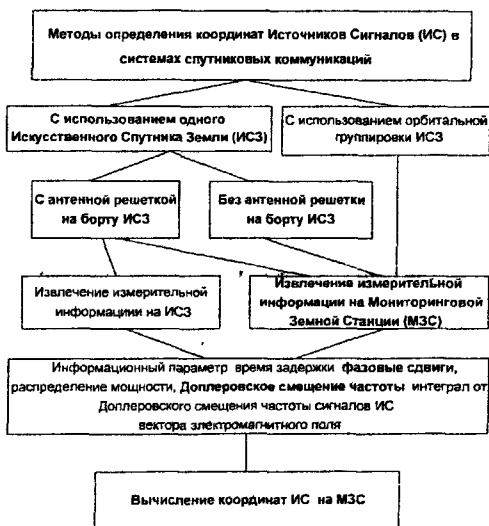


Рисунок 1 - Классификация методов определения координат ИС

Результаты экспериментальных исследований, выполненных с использованием ИСЗ Eutelsat II F4 и Eutelsat II F2, показали, что прием сигнала по боковому лепестку может быть осуществлен при диаметре приемной антенны порядка 20 м. и отсутствии дополнительных сигналов в исследуемой полосе частот. Потенциальная точность определения координат при использовании описанной методики, как считают авторы, может быть достигнута порядка (10...20) км. Однако, на практике погрешность достигала по одной

из координат (150...200) км, а иногда и 600 км. Такие результаты явно не имеют перспективы промышленного использования.

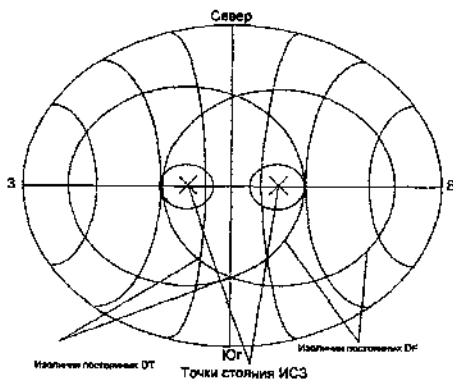


Рисунок 2 - Изолинии на поверхности Земли

Ограниченные возможности рассмотренного выше варианта определения координат ИС (постановщиков помех), связанные, прежде всего, с необходимостью использования двух ИСЗ, очевидны. Гораздо более эффективным с точки зрения решения поставленной задачи является направление, связанное с размещением на борту ИСЗ антенной решетки (АР), в простейшем случае из 3 – 4 элементов. Единственным источником информации для определения координат источника сигнала являются характеристики фронта принимаемой волны, что может быть оценено исключительно с помощью АР, когда угол прихода фронта волны оценивается по разности хода сигнала между элементами АР. Антенная решетка в минимальном составе из двух элементов позволяет определять только линию положения – линию равных угловых координат (например, по азимуту) при произвольных значениях дальности до источника сигнала в полярной системе координат. Вторая пара элементов АР, база которых традиционно располагается под прямым углом относительно базы первой пары, позволяет определить вторую координату. В ряде случаев вместо второй пары элементов АР используют только один элемент, при размещении всех трех элементов в трех углах квадрата или под углом 120° . Тогда в качестве элемента второй пары используют один из элементов первой пары.

Существующие коммуникационные ИСЗ оборудованы одной антенной для приема всех сигналов, поэтому определить угловые характеристики фронта принимаемой волны не

представляется возможным. Переизлучаемый с ИСЗ сигнал не несет информации о координатах ИС, поэтому определение координат не представляется возможным.

Рассмотренные выше системы определения координат ИС используют геостационарные ИСЗ. Задача, в принципе, решается и для низкоорбитальных ИСЗ, а также для ИСЗ с региональным лучом.

Круговая орбита геостационарного ИСЗ характеризуется углом наклоения i (угол между плоскостью экватора и плоскостью орбиты) и эксцентриситетом e т.е. отклонением орбиты от круговой. Идеальная геостационарная орбита имеет $i = 0$ и $e = 0$ и ИСЗ на такой орбите имеет нулевую скорость относительно Земного пользователя. Однако всегда имеются причины – притяжение Луны, Солнца, отличие Земного шара от идеального сфероида, негочности вывода ИСЗ на орбиту, в результате действия которых орбита имеет $e \neq 0$ и $i \neq 0$ (рисунок 3), что приводит к колебаниям ИСЗ, по широте и по долготе. В результате этого ИСЗ движется с периодом 24 часа по замкнутой траектории, напоминающей цифру «8», в плоскости, перпендикулярной экваториальной, в зависимости от точки вывода спутника. Для наблюдателя, расположенного в подспутниковой точке (точка в которой бы находился ИСЗ на ГСО, если $i = 0$ и $e = 0$) «размах» траектории максимален. При перемещении наблюдателя от подспутниковой точки на Запад или Восток наблюдаемый «размах» траектории уменьшается вплоть до вырождения в прямую линию из-за изменения угла наблюдения. Кроме того, в процессе движения по этой траектории ИСЗ удаляется или приближается к Земле, выше и ниже плоскости экватора.

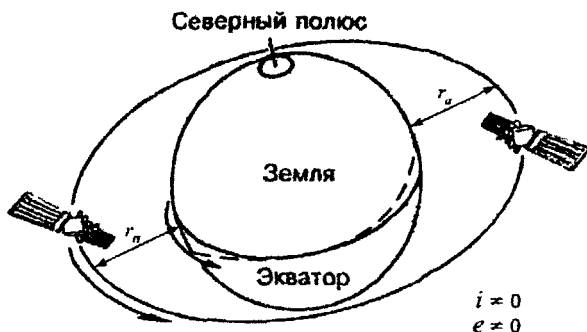


Рисунок 3 - Траектория движения ИСЗ на ГСО

Расстояние от минимального удаления до максимального удаления от Земли может достигать 1000 км. Изменение дальности ИСЗ в процессе движения по этой траектории

ранее в широкодоступной литературе не отмечалось, поскольку это обстоятельство не оказывает влияния на методы и процедуру сопровождения антенной ЭС ИСЗ, а проявляется только при фазово/временных траекторных измерениях.

В диссертации разработаны методы и устройства, рассматриваемые в последующих главах. определения координат ИС с использованием одного ИСЗ, с антенной решёткой на борту и без нее, с извлечением измерительной информации на Мониторинговой Земной Станции. В качестве информационного параметра используется разность фаз в антенной решётке и Доплеровское смещение частоты.

Вторая глава посвящена разработке методик определения координат ИС, на основе фазовых измерений.

Для измерения углов α_1 и β_1 в пространстве, фазовый радиопеленгатор должен иметь две пары антенн с взаимно перпендикулярными базами.

$$\alpha_1 = \arctg \frac{\Delta\psi_{1-2}}{\Delta\psi_{3-4}}, \quad \beta_1 = \arccos \frac{v}{2 \cdot \pi \cdot d} \cdot \sqrt{\Delta\psi_{1-2}^2 + \Delta\psi_{3-4}^2}. \quad (1)$$

где d – база антенн 1-2 и 3-4, v – длина волны принимаемого сигнала, $\Delta\psi_{1-2}$ и $\Delta\psi_{3-4}$ – сдвиг фаз между ЭДС, наведенными в антеннах 1-2 и 3-4

Углы, вычисленные по формулам (1) и (2), определяют направление прихода радиоволн излучаемых источником сигнала.

Поместив антенную решётку на геостационарном ИСЗ, можно определить направление на источник сигнала (ИС) относительно ИСЗ, затем вычислить его координаты в геоцентрической системе координат с учетом эллиптичности Земли. На рисунке 4 представлены геометрические построения для координат ИС, упуская промежуточные вычисления, широта и долгота ИС равна:

$$\varphi = \arcsin \frac{O_g}{R_{gl}}, \quad \lambda = \lambda_{sp} + \arccos \frac{f_{gl}}{c_g}. \quad (2)$$

Разработанная методика определения координат ИС с использованием антенной решётки на борту ИСЗ на ГСО требует доработки бортовой аппаратуры, поэтому она не применима для уже действующих ИСЗ на ГСО

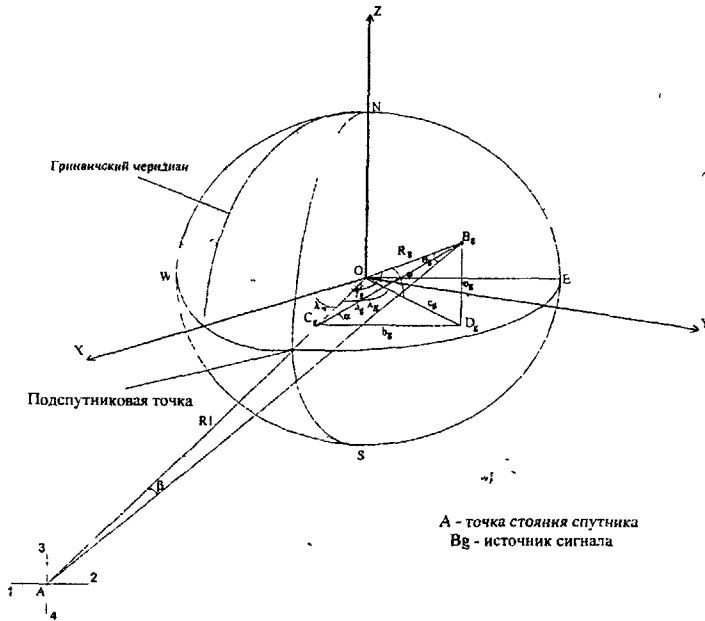


Рисунок 4 - Геометрические построения для расчета широты и долготы источника сигнала с учетом эллиптичности Земли

Однако, используя факт перемещения ИСЗ по суточной траектории, можно сформировать виртуальную антенную решётку (ВАР) в виде нескольких последовательных по времени позиций ИСЗ, точки A , A_1 и A_2 на рисунке 5. Измеряя разность фаз сигналов ИС в этих позициях при известных (или измеренных) координатах ИСЗ, можно определить координаты ИС. Данный факт позволил разработать фазовую методику определения координат ИС без доработки аппаратуры ИСЗ на ГСО.

Понятие ВАР схоже с понятием антенны с синтезированной апертурой. С помощью ВАР решается задача радиопеленгации, а не радиолокационная задача, для решения которой широко используется синтезирование апертуры антенны. Поэтому в диссертации был использован термин «виртуальная антенная решетка».

При фиксированном положении ИСЗ линией постоянного значения разности фаз $\Delta\psi_1$ на поверхности Земли является замкнутая кривая, образованная пересечением конуса.

вершина которого расположена в точке, принадлежащей базе ВАР (точка А. на рисунке 5), и поверхностью Земли.

Для ВАР условие перпендикулярности баз не является обязательным, так как угол прихода для каждой базы определяется независимо. Однако, в целях уменьшения погрешности координат ИС, данный факт можно использовать.

В центре площади, ограниченной кривой постоянного значения разности фаз $\Delta\psi_{1-2}$, находится проекция вектора скорости ИСЗ на поверхность Земли. Смещение ИСЗ по причинам, указанным выше, приводит к изменению координат подспутниковой точки и значения $\Delta\psi_{1-2}$, что соответствует другой замкнутой кривой.

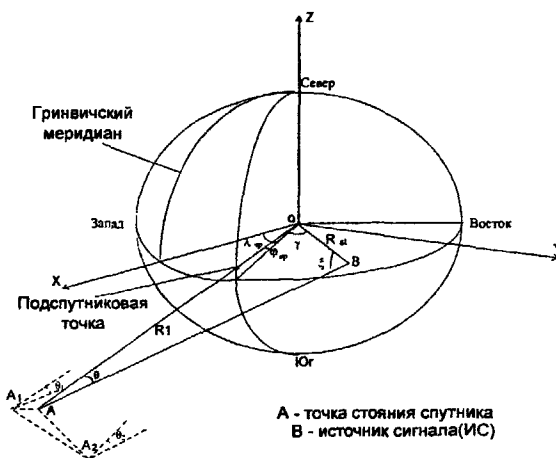


Рисунок 5 - Геометрические построения для определения координат ИС

В точке пересечения, как минимум, трех замкнутых кривых, координаты центров которых известны и различны, находится ИС (рисунок 6).

Координаты точки расположения ИС могут быть найдены следующим путем.

Направление прихода волны от ИС определяется по измеренному значению разности фаз $\Delta\psi_{1-2(j)}$ и равно:

$$\theta_j = \arccos \frac{v}{2 \cdot \pi \cdot d_j} \cdot \Delta\psi_{1-2(j)} \quad (3)$$

где j - номер измерения ($j = 1, 2, 3$); d_j - база антенн в j -ой позиции ВАР,
 $d_j = \sqrt{(x_{sp(j+1)} - x_{sp(j)})^2 + (y_{sp(j+1)} - y_{sp(j)})^2 + (z_{sp(j+1)} - z_{sp(j)})^2}$; $x_{sp(j+1)}$, $y_{sp(j+1)}$, $z_{sp(j+1)}$,
 $x_{sp(j)}$, $y_{sp(j)}$ и $z_{sp(j)}$ - координаты ИСЗ, служащие для формирования базы ВАР или координаты
 ИСЗ в которых производится измерения фазы сигнала; ν - длина волны принимаемого
 сигнала.

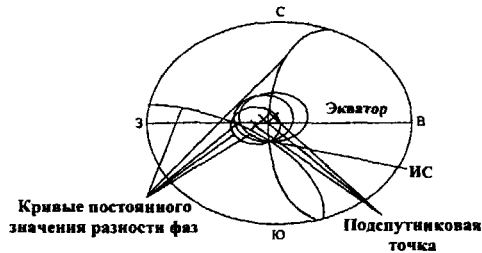


Рисунок 6 - Кривые постоянного значения разности фаз

Угол γ_j из рисунка 5:

$$\gamma_j = 180 - (\theta_j + \xi_j), \quad (4)$$

$$\text{где } \xi_j = \arcsin\left(\frac{R_{1j}}{R_{st(j)}} \sin(\theta_j)\right); R_{1j} - \text{модуль радиуса-вектора ИСЗ; } R_{st(j)} - \text{расстояние}$$

между центром Земли и точкой В на эллипсе, широта которой равна широте ИСЗ $\varphi_{sp(j)}$.

Координаты x_{oj} , y_{oj} и z_{oj} центра замкнутой кривой:

$$\left. \begin{aligned} x_{oj} &= R_{st(j)} \cos(\gamma_j) \cos(\varphi_{sp(j)}) \cos(\lambda_{sp(j)}) \\ y_{oj} &= R_{st(j)} \cos(\gamma_j) \cos(\varphi_{sp(j)}) \sin(\lambda_{sp(j)}) \\ z_{oj} &= R_{st(j)} \cos(\gamma_j) \sin(\varphi_{sp(j)}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Здесь $\lambda_{sp(j)}$ - долгота ИСЗ, а $\varphi_{sp(j)}$ - широта ИСЗ.

Каноническая форма, задающая плоскость E в пространстве, которой принадлежит замкнутая кривая, определяется выражением $E = A(x - x_0) + B(y - y_0) + C(z - z_0) = 0$, где x_0 , y_0 и z_0 - координаты точки, принадлежащей данной плоскости. В рассматриваемом случае

это координаты центра замкнутой кривой. (Отметим, что эти координаты являются проекцией подспутниковой точки на плоскость E.) A, B и C – координаты вектора нормали $\vec{n}(A,B,C)$ к данной плоскости, где $A=(x_0-x)$, $B=(y_0-y)$, и $C=(z_0-z)$. Начало вектора нормали совпадает с центром геоцентрической системы координат, т.е. $x=y=z=0$. Поэтому плоскость, в которой лежит замкнутая кривая и которая пересекает поверхность Земли, задается следующим уравнением:

$$x_{o_j}x + y_{o_j}y + z_{o_j}z = x_{o_j}^2 + y_{o_j}^2 + z_{o_j}^2 \quad (6)$$

Здесь x, y, z – координаты ИС.

Система из трех уравнений для трех отсчетов разности фаз $\Delta\psi_{1,2}$ при использовании (3...6) равна:

$$\left. \begin{aligned} x_{o_1}x + y_{o_1}y + z_{o_1}z &= x_{o_1}^2 + y_{o_1}^2 + z_{o_1}^2 \\ x_{o_2}x + y_{o_2}y + z_{o_2}z &= x_{o_2}^2 + y_{o_2}^2 + z_{o_2}^2 \\ x_{o_3}x + y_{o_3}y + z_{o_3}z &= x_{o_3}^2 + y_{o_3}^2 + z_{o_3}^2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Здесь индексы 1, 2 и 3 у переменных обозначают номер измерения. Результатом решения (7) являются искомые координаты ИС x, y, z . Пересчет значений x, y и z в географические широту φ и долготу λ ИС производится по выражениям:

$$\varphi = \arctg \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad \lambda = \arctg \frac{y}{x}. \quad (8)$$

Таким образом, координаты ИС определены.

При любой степени совершенства и точности измерительной аппаратуры, независимо от тщательности проведения эксперимента, измеренное значение отличается от истинного, так как при измерении неизбежны погрешности. Источниками погрешностей определения координат ИС с антенной решеткой на борту являются:

погрешность задания координат ИСЗ $\Delta\lambda_{сп}$, $\Delta\varphi_{сп}$ и ΔR_1 ;

погрешность измерения разности фаз $\Delta\Delta\psi_{1,2}$ и $\Delta\Delta\psi_{3,4}$;

погрешность ориентации антенной решетки относительно сетки меридианов и параллелей.

Погрешности определения координат ИС с виртуальной антенной решеткой:

погрешность задания координат ИСЗ $\Delta\lambda_{sp}$, $\Delta\varphi_{sp}$ и ΔR_1 ;

погрешность измерения разности фаз $\Delta\Delta\psi_{1,2}$.

Оценка широты φ и долготы λ ИС являются результатом косвенных измерений. При этом погрешности определения координат ИС вычисляются путем разложения в ряд Тейлора функциональных зависимостей с пренебрежением составляющими порядка выше первого.

На рисунке 7 а построены рабочие зоны для фазовой методики определения координат ИС с антенной решёткой на борту с ВАР рисунок 7 б, при погрешности задания координат ИСЗ $\Delta\lambda_{sp} = \Delta\varphi_{sp} = \Delta R_1 = 0$ и погрешности измерения разности фаз $\Delta\Delta\psi_{1,2} = \Delta\Delta\psi_{3,4} = 1^\circ$.

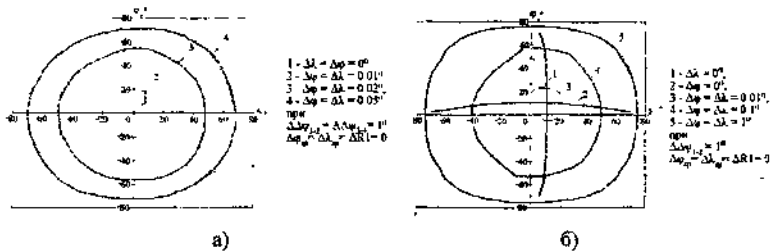


Рисунок 7 - Рабочие зоны

На Рисунке 8 приведены «Рабочие зоны» для погрешностей определения координат ИС с учётом вносимых погрешностей задания координат ИСЗ, при нулевом значении погрешности измерения разности фаз $\Delta\Delta\psi_{1,2} = \Delta\Delta\psi_{3,4} = 0^\circ$.

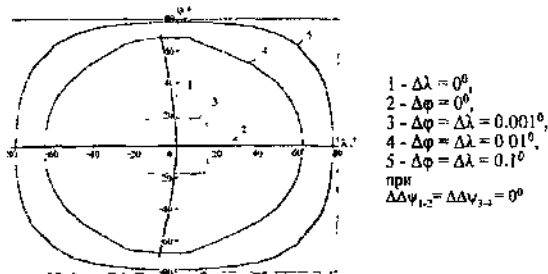


Рисунок 8 - Рабочие зоны

Как видно из «Рабочих зон», рисунок 7, методика определения координат с ВАР уступает методике с антенной решёткой на борту ИСЗ по размеру территории, в пределах которой погрешности определения координат не превышают заданные значения. Однако методика определения координат с ВАР технически более предпочтительна, поскольку не требует доработки аппаратуры ИСЗ и может быть использована с современным семейством работающих коммуникационных ИСЗ. Систематические погрешности определения координат могут быть уменьшены путем повышения точности определения текущих координат ИСЗ или при использовании калибровочных измерений.

Погрешности задания координат ИСЗ в соответствии с рисунком 8 влияют на погрешности определения координат ИС. Для фазовой методики с антенной решёткой на борту погрешности задания координат ИСЗ сопоставимы с методическими погрешностями. Для методики с виртуальной антенной решёткой эти погрешности на порядок ниже.

Погрешность определения координат ИС содержит случайную составляющую погрешностей по долготе $\delta\lambda$ и по широте $\delta\varphi$, вызванную случайной погрешностью измерения разности фаз $\delta\psi_{1-2}$ и $\delta\psi_{3-4}$. При использовании случайной составляющей погрешности флуктуаций фазы $\delta\psi_{1-2}$ и $\delta\psi_{3-4}$ с нормальным законом распределения, нулевым математическим ожиданием $m = 0$ и для трёх значений дисперсии $\sigma^2 = 1, 2$ и 4 результаты статистического моделирования приведены на рисунке 9 а, б.

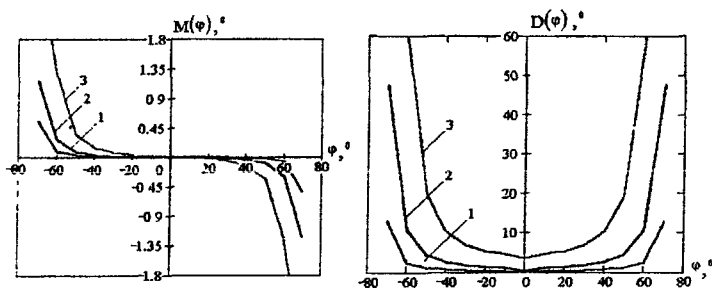


Рисунок 9 а) - Антенная решётка на борту ИСЗ
(без учета погрешностей, вносимых ИСЗ)

Как видно, математические ожидания $M(\lambda)$, $M(\varphi)$ и дисперсии $D(\lambda)$, $D(\varphi)$ случайной составляющей погрешности определения координат ИС по долготе $\delta\lambda$ и по широте $\delta\varphi$, вызванные случайной составляющей измерения фазы, зависят от местоположения ИС.

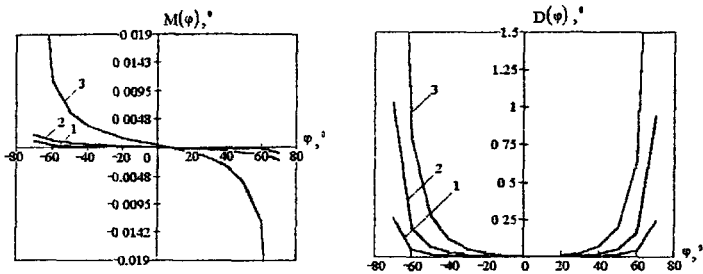


Рисунок 9 б) - Виртуальная антенная решётка

(без учета погрешностей, вносимых ИСЗ)

$$1 - M(\Delta\psi_{1-2}, \Delta\psi_{3-4})=0^0, D(\Delta\psi_{1-2}, \Delta\psi_{3-4})=1^0$$

$$2 - M(\Delta\psi_{1-2}, \Delta\psi_{3-4})=0^0, D(\Delta\psi_{1-2}, \Delta\psi_{3-4})=2^0$$

$$3 - M(\Delta\psi_{1-2}, \Delta\psi_{3-4})=0^0, D(\Delta\psi_{1-2}, \Delta\psi_{3-4})=4^0$$

Как для фазовой методики с антенной решёткой на борту, так и для ВАР, математическое ожидание и дисперсия увеличиваются с перемещением ИС к краям зоны радиовидимости.

Третья глава посвящена разработке методики определения координат ИС, на основе эффекта Доплера.

Как отмечалось выше в главе 2, неидеальность геостационарной орбиты приводит не только к колебаниям ИСЗ по широте, долготе и дальности, но и к возникновению эффекта Доплера.

Сущность разработанной методики определения координат ИС на основе эффекта Доплера близка фазовой методике с ВАР, разработанной и исследованной в главе 2. Отличие состоит в том, что измеряемым параметром является частота Доплера, а не фазовый сдвиг. Поэтому материал, приведенный в главе 2, справедлив в рассматриваемом случае с учетом сделанной выше оговорки.

Источниками погрешностей методики определения координат ИС основанной на измерении частоты Доплера являются:

погрешность задания координат ИСЗ $\Delta\lambda_{sp}$, $\Delta\varphi_{sp}$ и ΔR_1 ;

ΔF_d – погрешность измерения частоты Доплера;

Δf -- погрешность, вызванная расстройкой частоты ИС относительно центральной частоты тракта.

Определение широты φ и долготы λ ИС является результатом косвенных измерений, таких как и для фазового метода.

На рисунке 10 приведены «Рабочие зоны» Расчеты проводились без учета погрешности задания координат ИС $\Delta\lambda_{sp} = \Delta\varphi_{sp} = \Delta R_1 = 0$.

В процессе движения ИСЗ по суточной траектории имеются участки, на которых скорость движения ИСЗ $|V_1| \approx |-V_2|$, где индексы 1, 2 обозначают номера участков траектории движения ИСЗ. На этих участках погрешности определения координат $|\Delta\lambda_1| \approx |\Delta\lambda_2|$ и, соответственно, $|\Delta\varphi_1| \approx |\Delta\varphi_2|$.

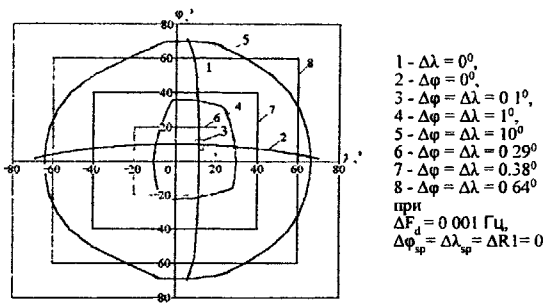


Рисунок 10 – Рабочие зоны

Очевидно, что $\lambda_1 = \lambda_{ист} + \Delta\lambda_1$, $\lambda_2 = \lambda_{ист} - \Delta\lambda_2$, где λ_1 и λ_2 - расчетные значения долготы соответственно в первой и второй точках, $\lambda_{ист}$ - истинное значение долготы ИС. Тогда справедливо выражение:

$$\lambda_{sp} = \lambda_{ист} + \frac{|\Delta\lambda_1| - |\Delta\lambda_2|}{2}. \quad (9)$$

В пределах зоны, обозначенной на рис. 3.1 цифрой 6 погрешности $\Delta\lambda$ и $\Delta\varphi$, вычисленные по (9) и аналогичному выражению для широты, не превышают 0.29° , а в пределах зоны, обозначенной цифрой 7, - не более 0.38° . Все расчеты выполнены при погрешности измерения доплеровского смещения частоты $\Delta F_d \approx 10^{-3}$ Гц.

Выражение (9) применимо и для фазовой методики с ВАР.

Результаты расчетов для разработанных методик показали, что Доплеровская методика значительно уступает (на порядок) в погрешности определения координат ИС с помощью ВАР и на два порядка фазовой методике с антенной решёткой на борту ИСЗ на ГСО при сопоставимых погрешностях, с которыми выполняются измерительные процедуры. Это следует из рассмотрения размеров «Рабочих зон» на рисунки 7, 8 и 10. Однако, при использовании разработанной процедуры уменьшения погрешности, описанной выше, для фазовых измерений преимущества фазовых методик относительно Доплеровской становятся еще более очевидными.

Четвёртая глава посвящена основам технической реализации разработанных методик определения координат ИС в системе спутниковой связи.

Определение координат ИС с антенной решеткой на борту ИСЗ состоит в следующем. На борту ИСЗ размещаются 4 приемных антенны элемента, которые сгруппированы в двумерную антенную решетку, одна из осей которой лежит в меридиональной плоскости, а другая - в плоскости экватора Земли. В состав разработанного устройства входит командная радиолиния для передачи с МЗС на ИСЗ для поочередного подключения антенн бортовой антенной решетки к тракту трансляции сигналов ИС на МЗС. Запоминания фазы сигналов ИС производится в оперативном запоминающем устройстве МЗС. В вычислительно-индикаторном блоке МЗС, в состав которого входит фазометр, производится измерение разности фазовых сдвигов $\Delta\psi_{1-2}$ и $\Delta\psi_{3-4}$ между сигналами, принятыми элементами антенной решетки. Также в вычислительно-индикаторном блоке производится вычисление широты φ и долготы λ ИС по формулам, приведенным в главе 2.

Как показано выше, определение координат с помощью разработанного устройства обеспечивается с наиболее высокой точностью. Важной особенностью устройства, защищенного положительным решением на выдачу патента РФ, является необходимость размещения на ИСЗ дополнительных антенн и узлов, что ограничивает возможности методики для уже действующих ИСЗ на ГСО. В будущем создание систем определения координат ИС должно развиваться именно этим путем. Как показывает анализ проектов в области спутниковых коммуникаций, в конструкции бортовой аппаратуры практически всех перспективные ИСЗ заложены антенные решетки с целью управления пространственным положением луча(ей). Однако, это не является препятствием для использования антенных решеток в целях определения координат ИС.

Разработан способ и устройство определения координат ИС, использующие суточное движение ИСЗ на ГСО без доработки бортовой аппаратуры. На МЗС производится измерение дальности и угловых координат (азимут и угол места) ИСЗ. Данные об азимуте.

угле места и дальности исчерпывающим образом описывают положение ИСЗ в каждый момент времени. Эти данные заносятся в буфер данных (ОЗУ). Сигнал ИС принимается приемником сигнала ИС, входящим в состав приемо/передающего тракта и подвергается коррекции Доплеровского смещения частоты. В блоке измерения фазы сигнала (или частоты Доплера в соответствии с Доплеровской методикой) выполняется оценка и запоминание текущей фазы несущей частоты сигнала (или частоты Доплера). В ОЗУ формируется банк кластеров текущих параметров, каждый из которых состоит из 4 параметров: азимут, угол места, дальность ИСЗ и фаза сигнала (частота Доплера). Оценка значений параметров кластера производится в единый момент времени. В ОЗУ производится накопление достаточно большого количества кластеров.

В блоке выбора наилучших кластеров производится выбор, как минимум, 4-х кластеров, сгруппированных в пары. Одна из пар представляет собой одну эквивалентную виртуальную базу, в концах которой фаза сигнала ИС соответствует записанным в ОЗУ значениям. Координаты концов виртуальной базы заданы другими параметрами в выбранных кластерах, а именно азимутом, углом места и дальностью ИСЗ. Зная эти координаты легко вычислить пространственное расположение виртуальной базы относительно экваториально-меридиональной плоскостей и ее длину. Вторая пара из выбранных кластеров таким же путем определяет вторую виртуальную базу. Критерием выбора кластеров из накопленного массива является степень близости угла пересечения виртуальных баз к 90° , при котором минимизируется погрешность определения координат неизвестного передатчика. Критерием выбора наилучших кластеров для Доплеровской методики, является максимальное значение частоты Доплера. В вычислительно-индикаторном блоке вычисляются координаты ИС по формулам, приведенным в главе 2. Для Доплеровской методики в вычислительно-индикаторном блоке вычисляются координаты ИС, как минимум по трем кластерам, по формулам приведенным в главе 3.

Таким образом, измерив, азимут, угол места, дальность и фазу сигнала (или частоту Доплера) ИС и произведя необходимые вычисления, можно определить направление на ИС относительно ИСЗ и как следствие, координаты ИС в геоцентрической системе координат.

Данный способ и устройство защищены положительным решением на выдачу патента РФ.

Как показано выше (первая глава) реальная орбита спутника несколько отличается от гипотетически круговой, поскольку имеет ненулевые эксцентриситет и наклонение. Относительно неподвижного Земного наблюдателя спутник перемещается по замкнутой траектории, очертающей напоминающей цифру «8» с периодом один сутки. Это приводит к тому, что спутник удаляется и/или приближается относительно поверхности Земли. т.е.

расстояние, а, следовательно и фаза сигнала, в течение времени измерения $T_{изм}$ не остаются постоянными. Отсюда следует, что фазовая компонента принимаемого сигнала содержит не только постоянную измеряемую разность начальных фаз φ_x , но и φ_n – медленно меняющуюся переменную составляющую, вызванную перемещением спутника за измерительное время. В общем виде, фаза принимаемого сигнала зависит от времени:

$$\Psi(t) = \varphi_x \pm Vt, \quad (10)$$

где v – скорость измерения переменной составляющей.

Переменная составляющая существенно искажает результат измерения искомой величины φ_x , или другими словами, снижает точность измерения разность начальных фаз.

Расчеты и анализ показывают, что в любых позициях спутника, независимо от мгновенного значения скорости его движения в двух смежных измерительных интервалах, при времени измерения порядка $T_{изм} \approx (1 \dots 10)$ сек. приращение переменной составляющей не превышает значений $(0.01 \dots 0,001)^0$, что позволяет считать ее линейной величиной. Это обстоятельство позволяет исключить переменную составляющую из результата измерения с точностью $(0.01 \dots 0,001)^0$, что вполне удовлетворяет требованиям практики.

Пусть в первом измерительном цикле результат измерения, когда скорость изменения переменной составляющей в формуле (10) положительна $\Psi_1 = \varphi_x + \varphi_n$, а во втором: $\Psi_2 = \varphi_x + 2\varphi_n$. Тогда $\Psi_2 - \Psi_1 = \varphi_n$, что позволяет получить интересующее значение $\varphi_x = \Psi_1 - \varphi_n$ и

$$\varphi_x = \Psi_1 - (\Psi_2 - \Psi_1) = 2\Psi_1 - \Psi_2. \quad (11)$$

Когда скорость изменения переменной составляющей в (10) отрицательна, то $\Psi_1 = \varphi_x - \varphi_n$, $\Psi_2 = \varphi_x + \varphi_n/2$. Тогда:

$$\varphi_x = \Psi_2 - (\Psi_1 - \Psi_2) = 2\Psi_2 - \Psi_1. \quad (12)$$

Выражения (11, 12) являются основой для реализации устройства. Устройство исключения переменной составляющей, вызванной движением спутника за измерительное время, разработано и защищено патентом РФ.

В главе четыре рассмотрены пути решения проблем связанных с выделением несущей частоты сигнала ИС, с исключением многозначности угломерных измерений и измерения

разности начальных фаз двух несинхронизированных генераторов. Предъявлены требования к точности фазовых и частотных измерений

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана классификация методов определения координат ИС в системах связи с использованием ИСЗ на ГСО.
2. Разработаны и теоретически обоснованы:
 - фазовая методика определения координат ИС, использующая антенную решётку на борту ИСЗ на ГСО,
 - фазовая методика определения координат ИС, использующая виртуальную антенную решетку.
 - методика определения координат ИС на основе эффекта Доплера.
3. Определены источники погрешностей определения координат ИС для разработанных методик.
4. Выполнена оценка и сопоставление погрешностей определения координат ИС для разработанных методик.
5. Получены оценки погрешностей, вызванных неточностью задания положения ИСЗ.
6. Обоснована возможность повышения точности определения координат ИС на определенных участках траектории движения ИСЗ на ГСО.
7. Разработан способ увеличения размеров рабочей зоны определения координат ИС.

ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ РАБОТЫ

1. Панько, С. П. Доплеровское измерение координат в системе спутниковой связи / С. П. Панько, В. В. Сухотин; Материалы VIII международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC*2002). - Воронеж, 2002. - с. 30-32.
2. Панько, С. П. Несанкционированный доступ в системы спутниковых коммуникаций. / С. П. Панько, В. В. Сухотин // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. - 2002 г. - № 4. - с. 15-27.
3. Панько, С. П. Фазовая пеленгация в спутниковой связи. /С. П. Панько, Сухотин В. В.// Электронный журнал "Исследовано в России". - 2003 г. - №35. - с. 380-388.

4. Сухотин, В.В. Источники погрешностей при определении координат. / В. В. Сухотин; Материалы VI всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Решетневские чтения". - Красноярск, 2002. - с. 39-42.
5. Положительное решение по заявке на изобретение 2001115812/09, МПК 7 G01S 1/06. Способ и устройство для определения координат неизвестного передатчика / С. П. Панько, В. В. Сухотин. - № 2001115812/09; Заявлено 08.06.2001; Опубл. 10.06.2003. (<http://www.fips.ru/russite/default.htm>)
6. Положительное решение по заявке на изобретение 2001133721, МПК 7 G01S 3/00. Способ определения координат неизвестного передатчика в системе спутниковой связи и устройство для его осуществления. / С. П. Панько, В.В. Сухотин, В.Ф. Чумиков, В.В. Югай. - № 2001133721/09; Заявлено 11.12.2001; Опубл. 10.08.2003. (<http://www.fips.ru/russite/default.htm>)
7. Пат. 2207579 РФ, МПК 7 G01R 25/08. Цифровой фазометр. / С. П. Панько, В.В. Сухотин, В.Ф. Чумиков, В.В. Югай. - № 2002101423/09; Заявлено 11.02.2002; Опубл. 27.06.2003, Бюл: №18.
8. Suhotin, V. Determination of Unknown Transmitter Coordinates in a Communication Satellite System / S. Panko, V. Suhotin; 19th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, - Toulouse, April, 2001. - с. 75-78.
9. Панько, С. П. Новая проблема спутниковых коммуникаций / С. П. Панько, В.В. Сухотин; Материалы Международной конференции «Информационные системы и технологии». - Новосибирск, 2000. - с. 61-65.
10. Сухотин, В.В. Моделирование метода исключения систематической погрешности, при определении координат с помощью ГЛОНАСС / Д.П. Шабанов, А.В. Косолапов; Материалы всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники», посвященной 103-й годовщине Дня Радио - Красноярск, 1998. - с. 50-52.
11. Панько, С.П. Пеленгация источников помех в системах спутниковой связи / С. П. Панько, В. В. Сухотин; Материалы всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники», посвященной 104-й годовщине Дня Радио. - Красноярск, 1999. - с. 23-26.
12. Панько, С.П. Определение координат неизвестного передатчика в системе спутниковой связи / С. П. Панько, В. В. Сухотин; Материалы всероссийской научно-

№ 17326
2003-А
17326

технической конференции молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники», посвященной 105-й годовщине Дня Радио. - Красноярск, 2000. - с. 71-72.

13. Сухотин, В.В. Передача информации в спутниковой связи с использованием протокола FRAME RELAY / В.В. Сухотин, А.А. Кудрявцев; Материалы III всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники», посвященной 106-й годовщине Дня Радио. - Красноярск, 2001. - с. 54-56.

14. Сухотин, В.В. Определение направления прихода радиоволн с использованием виртуальной антенной решетки / В.В. Сухотин; Всероссийская дистанционная научно-техническая конференция молодых ученых и студентов "Современные проблемы радиоэлектроники", посвященная 107-й годовщине Дня Радио. - Красноярск, 2002. - с. 15-17.

15. Панько, С.П. Фазовый метод определения координат / С. П. Панько, В.В. Сухотин; Материалы 9 международной научно-технической конференции студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, Электротехника и Энергетика". - Москва, 2003. - с. 19-22.

Соискатель:



В.В. Сухотин

Подписано в печать 20.10.2003

Формат бумаги 60×80 1/16

Усл. печ. л. 1,6

Тираж 100 экз. Заказ 941

Отпечатано на ризографе КГТУ

660074, Красноярск, Киренского 26