

На правах рукописи

Гребенников Андрей Владимирович

**Исследование методов и разработка аппаратуры приема и
обработки сигналов спутниковых радиотехнических систем**

05.12.21 – Радиотехнические системы специального назначения, включая технику
СВЧ и технологию их производства

Автореферат

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Красноярск – 2000

Работа выполнена в Красноярском государственном техническом университете.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Цмых М.К.

кандидат технических наук, с.н.с. Кокорин В.И.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Панько С.П.

кандидат технических наук, доцент Черников Д.Ю.

Ведущая организация: Научно-производственное объединение прикладной механики им. академика М.Ф. Решетнева,
г. Железногорск

Защита состоится 27.07 2000г. в 14 час. на заседании диссертационного совета Д 064.54.03 при Красноярском государственном техническом университете по адресу: 660074, Красноярск, ул. акад. Киренского, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Красноярского государственного технического университета.

Автореферат разослан 23.06. 2000г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 064.54.03

кандидат технических наук, доцент

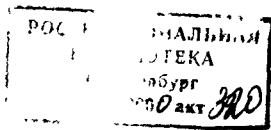


Ю.П. Саломатов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Спутниковые радиотехнические системы (СРТС) находят широкое применение в различных сферах деятельности – радиосвязь, радионавигация, системы управления движением, экологический мониторинг, исследование параметров Земли и др. Развитие СРТС во многом определяется прогрессом в создании аппаратуры приема и обработки сигналов (АПС). Проблема исследования и развития методов обработки сигналов в приемной аппаратуре СРТС с целью создания АПС, обладающей широкими функциональными возможностями и высокими показателями по помехоустойчивости, точности определения параметров, массогабаритным характеристикам, а также стоимости и технологичности производства является актуальной.

В работах В.Б. Пестрякова, В.С. Шебшаевича, М.К. Чмыха, А.М. Агафонова и др. сделан вывод о перспективности фазовых методов измерения, позволяющих значительно повысить характеристики приемной аппаратуры. В частности, показано, что наивысшую точность навигационных определений по сигналам спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС обеспечивают приемники, производящие измерения не только по дальномерному коду, но и по фазе несущей частоты радионавигационного сигнала. При этом используются специальные алгоритмы определения навигационных параметров, которые могут быть реализованы только на основе фазовых измерений, причем фаза сигнала выступает как самостоятельный радионавигационный параметр. Аппаратура, обеспечивающая высокоточные измерения по фазе несущей, потенциально позволяет определять относительные координаты и/или траекторию движения объектов с погрешностью 0,001...0,1 м. При приеме сигналов на разнесенные в пространстве антенны, на основе фазовых измерений обеспечивается расширение функциональных возможностей аппаратуры, позволяющее определять пространственную ориентацию объекта с погрешностью в единицы угловых минут. Необходимость разработки фазовой аппаратуры отмечается в «Российском радионавигационном плане», одобренном Правительством РФ в 1998г.



Цель работы. Целью диссертации является исследование методов обработки сигналов в фазовой приемной аппаратуре СРТС и разработка способов и алгоритмов, обеспечивающих высокую точность измерения параметров сигналов и конкурентоспособные технико-экономические характеристики аппаратуры. В соответствии с поставленной целью решаются следующие задачи:

1. Исследование методов измерения фазы сигналов, оценка погрешности измерения фазового сдвига, оптимизация процедур обработки сигнала с целью повышения точности измерения и минимизации аппаратурной реализации.
2. Разработка методов измерения разности фаз сигналов, принятых разнесенными в пространстве антеннами, для определения пространственной ориентации.
3. Практическая реализация приемной аппаратуры спутниковых систем.

Методы исследования. При проведении теоретических и экспериментальных исследований были использованы методы теории вероятности и случайных процессов, статистического анализа и синтеза, методы оптимальной линейной и нелинейной фильтрации, методы спектрального анализа, методы статистического моделирования

Научная новизна. Новыми являются следующие результаты работы:

1. Разработаны методы, позволяющие уменьшить погрешность измерения параметров сигналов в цифровой фазовой аппаратуре. Отработаны решения минимизирующие аппаратурные затраты при реализации блока цифровой обработки сигналов.
2. Предложен и защищен патентом РФ способ обработки сигнала в цифровых приемных устройствах, позволяющий в несколько раз расширить частотный диапазон измеряемых сигналов без применения быстродействующей элементной базы.
3. Обоснованы, разработаны и исследованы устройства кодового разделения сигналов антенн, позволяющие обрабатывать в едином тракте сигнал от нескольких антенн, с целью определения пространственной ориентации.

4 Разработан метод уменьшения погрешности измерения разности фаз сигналов антенн, разнесенных в пространстве для определения пространственной ориентации.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в следующем. Разработан метод измерения с погрешностью в единицы градусов разности фаз сигналов, принятых разнесенными в пространстве антеннами. Разработаны методы построения АПС, позволяющие минимизировать аппаратные затраты и реализовать цифровую фазовую аппаратуру с высокими эксплуатационными, массогабаритными и стоимостными характеристиками на элементной базе широкого применения без использования специализированных заказных БИС. Созданная по результатам проведенных исследований аппаратура позволяет определять пространственную ориентацию с погрешностью в единицы угловых минут, а также относительные координаты с погрешностью в единицы сантиметров и может быть использована для наведения антенн подвижных станций спутниковой и тропосферной связи, создания пилотажно-навигационных комплексов, комплексов автоматизированного картографирования, синхронизации удаленных генераторов и др.

Реализация и внедрение результатов. На основе результатов, полученных при выполнении диссертационной работы, разработаны, испытаны и внедрены в серийное производство образцы фазовых навигационных приемников ГЛОНАСС/GPS, в т.ч. МРК-15, МРК-17, МРК-19Л, МРК-23. Впервые в России разработана и запущена в серийное производство аппаратура ГЛОНАСС/GPS, позволяющая определять не только координаты, скорость и поправку к шкале времени потребителя, но и пространственную ориентацию объектов с погрешностью в единицы угловых минут (МРК-11). Результаты исследований, проведенных в работе, использованы в 18 НИР и ОКР, выполненных в Красноярском государственном техническом университете и Государственном научно-производственном предприятии «Радиосвязь» с целью разработки систем под-

вижной связи, автоматизированной системы управления движением поездов «Магистраль», оснащения геофизической авиационной лаборатории и др.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях, в том числе: международная конференция «Интерприбор-90» в Москве (1990), конференция с международным участием «Проблемы техники и технологии XXI века» в Красноярске (1994); международная конференция «Спутниковая связь» в Москве (1994); вторая российская научно-техническая конференция «Современное состояние, проблемы навигации и океанографии» в Санкт-Петербурге (1995); Second International Conference on development directions of the radio communication systems and means. Voronezh. (1995); международная конференция «Планирование глобальной радионавигации» в Москве (1995); международная конференция «Спутниковая связь» в Москве (1996); международная конференция «Планирование глобальной радионавигации» в Москве (1997); научно-техническая конференция с международным участием «Спутниковые системы связи и навигации» в Красноярске (1997); научно-практическая конференция «Проблемы и технологии создания и использования космических систем и комплексов на базе малых КА и орбитальных станций» в Москве (1998); научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация и связь» в Воронеже (1998); научно-техническая конференция «Достижения науки и техники – развитию сибирских регионов» в Красноярске (1999); научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация и связь» в Воронеже (1999); Вторая всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Достижения науки техники – развитию сибирских регионов» в Красноярске (2000), «VII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам» в Санкт-Петербурге (2000); Вторая всероссийская научно-техническая конференция «Навигация и управление движением» в Санкт-Петербурге (2000).

Публикации. Результаты, полученные при выполнении диссертации, опубликованы в 20 печатных работах. Получено 5 патентов на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 93 наименований и 2 приложений. Основной текст содержит 97 страниц, иллюстрируется 31 рисунком.

Основные положения, представляемые к защите:

1. Группирование данных не только на выходе дискриминатора, но и на различных этапах обработки сигнала в дискриминаторе, в устройствах оптимальной фильтрации параметров сигнала, состоящих из дискриминатора и оптимального линейного фильтра, позволяет уменьшить частоту дискретизации и минимизировать аппаратные затраты.
2. Применение комбинаторной обработки сигналов, предусматривающей использование запоминающих устройств в качестве универсального функционального преобразователя случайного входного сигнала дискретизированного по времени и квантованного по уровню, позволяет расширить частотный диапазон цифровой обработки сигналов (ЦОС), путем уменьшения в несколько раз требуемого значения тактовой частоты устройств цифровой обработки, а также улучшить функциональные характеристики ЦОС.
3. Кодовый метод разделения при обработке сигналов антенн в едином радиотракте, с целью уменьшения систематической погрешности измерения разности фаз между антеннами при определении пространственной ориентации, обеспечивает уменьшение погрешности измерения разности фаз и является более эффективным по сравнению с коммутационным методом.
4. Увеличение коэффициента передачи тракта основной антенны до суммирования сигналов, с одновременным увеличением времени накопления сигнала в каналах измерения фазы дополнительных антенн, при кодовом разделении сигналов антенн, обеспечивает уменьшение случайной составляющей погрешности измерения фазового сдвига.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит общую характеристику работы. Обосновывается актуальность темы, формулируются цели и задачи исследования, приводится краткое содержание работы.

Первая глава посвящена анализу методов измерения параметров сигналов космических аппаратов (КА) СРТС и погрешностей, сопровождающих измерение. Анализ был проведен на примере АПС ГЛОНАСС и позволил сделать следующие выводы. Как правило, измеритель параметров сигнала КА строится по схеме, синтезированной с позиций теории оптимальной фильтрации. Как показано в работах Л. Рабинера, Л.М. Гольденберга, М.К. Чмыха, и др., реализация измерителя параметров сигнала в цифровой форме имеет ряд преимуществ по сравнению с аналоговой обработкой. В то же время, цифровая обработка сигнала (ЦОС) в АПС СРТС часто является сложной задачей. Например, в цифровой АПС ГЛОНАСС широкий спектр частот группового сигнала КА обуславливает высокую частоту дискретизации, что при ограниченном быстродействии устройств ЦОС существенно затрудняет реализацию аппаратуры. Кроме того, для АПС существует проблема минимизации аппаратуры, вызванная необходимостью реализаций большого числа приемных каналов.

По результатам проведенного в диссертации анализа, источники погрешности, возникающей при приеме и измерении параметров сигналов КА в фазовой АПС, были выделены в следующие группы: 1) шумы в составе входного сигнала; 2) изменение измеряемых параметров в процессе измерения, связанное с взаимным перемещением АПС и КА; 3) интерференция прямого сигнала и сигналов, отраженных от местных предметов, 4) неидентичность фазовых характеристик приемных антенн, 5) неидентичность задержек в трактах обработки сигналов антенн, разнесенных в пространстве при измерении пространственной ориентации. Для различных СРТС влияние указанных источников оказывается различным и зависит от диапазона частот сигналов, энергетического потенциала радиолиний КА–АПС, условий приема и т.п. Для АПС, опреде-

ляющей пространственную ориентацию, по результатам аналитического исследования был сделан вывод о том, что наиболее существенный вклад в результирующую погрешность определения разности фаз между сигналами антенн вносит, возникающая непосредственно в приемной аппаратуре, систематическая погрешность, обусловленная неидентичностью задержек в каналах обработки сигналов антенн.

Вторая глава посвящена разработке методов и алгоритмов обработки сигнала, обеспечивающих высокую точность измерения фазового сдвига и конкурентоспособные технико-экономические характеристики аппаратуры при их практической реализации. Проработка конкретных численных значений проводилась с использованием модели сигнала СРТС ГЛОНАСС.

В современных вариантах АПС, чаще всего, на вход устройства цифровой обработки поступает групповой спектр сигналов КА перенесенный на промежуточную частоту (ПЧ) без выполнения демодуляции псевдослучайной последовательности (ПСП) дальномерного кода в аналоговом тракте. В этом случае частота дискретизации при выполнении аналого-цифрового преобразования:

$$f_d \geq 2 \cdot (\Delta f_{ГС} + f_{ПЧ \min}),$$

где: – $\Delta f_{ГС}$ – ширина спектра группового сигнала КА,

– $f_{ПЧ \min}$ – минимальное значение промежуточной частоты.

Как показано в работах Л.М. Гольденберга, А.И. Перова, В.Н. Харисова, и др., одним из приемов, используемых при реализации устройств ЦОС для повышения функциональных и технико-экономических характеристик аппаратуры, является снижение требуемой частоты дискретизации (децимация). В результате нелинейных преобразований сигнала КА в дискриминаторе происходит изменение информационной полосы частот обрабатываемого сигнала. Соотношение частот дискретизации на входе (f_d) и выходе ($f_{d_вых}$) дискриминатора – M определяется как:

$$M = \frac{f_d}{f_{d_вых}} = \frac{\Delta f_{ГС} + f_{ПЧ\ min}}{\Delta f_{\Theta}} \gg 1,$$

где: Δf_{Θ} – полоса частот измеряемого параметра – фазы сигнала.

Поскольку $\Delta f_{\Theta} \ll \Delta f_{ГС}$, выборки выходного сигнала с частотой f_d могут быть сгруппированы. Группирование выборок, в простейшем случае, производится путем их суммирования. Обычно, так группируются данные на выходе дискриминатора, для снижения частоты дискретизации при переходе к программной части ЦОС, в которой реализуется фильтр Калмана. Сам дискриминатор при этом выполнен аппаратно. Предложено производить группирование данных в процессе ЦОС неоднократно, с учетом изменения времени корреляции измеряемых параметров сигнала в процессе его обработки. В устройстве ЦОС АПС ГЛОНАСС выделяется три группирования данных. Первое группирование – после преобразования частоты входного сигнала, при котором спектр сигнала выбранного КА переносится с ПЧ на частоту, обусловленную доплеровским смещением. Второе группирование – после выполнения демодуляции ПСП дальномерного кода. Третье – после умножения демодулированного сигнала на гармонический опорный сигнал (ОС), перестраиваемый по фазе и ее производным – доплеровскому сдвигу частоты (ДСЧ), скорости изменения ДСЧ и т.д. Значения частоты дискретизации после каждого группирования:

$$f_{d1} \geq 2 \cdot (\Delta f_{ПСП} + |f_{\delta_max}|), \quad f_{d2} \geq 2 \cdot |f_{\delta_max}|, \quad f_{d3} \geq 2 \cdot \Delta f_{\Theta},$$

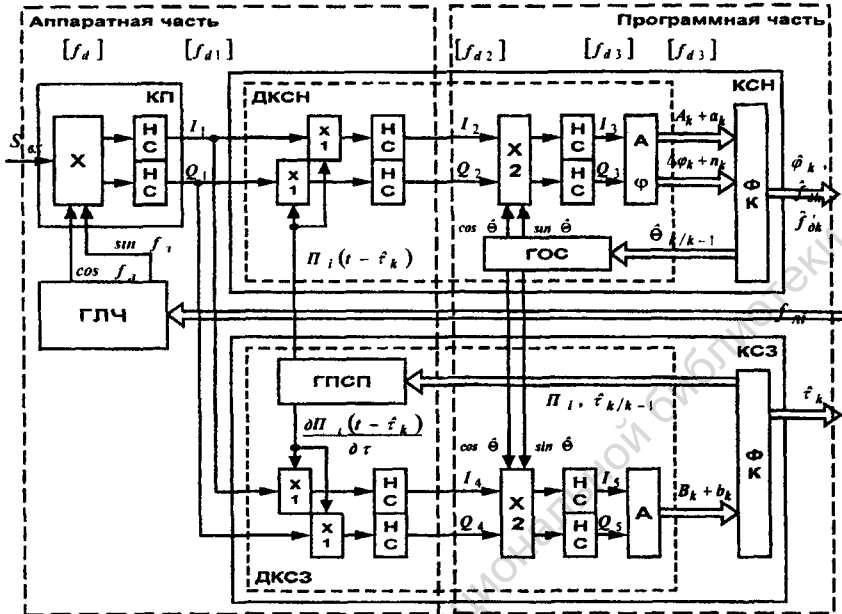
где: $\Delta f_{ПСП}$ – ширина спектра ПСП дальномерного кода;

f_{δ_max} – максимальное значение доплеровского сдвига частоты.

С учетом используемого в системе ГЛОНАСС частотного разделения сигналов КА, для АПС, устанавливаемой на объекты с различными маневренными характеристиками, значения частот дискретизации составят:

$$f_d = 45 \dots 80 \text{ МГц}, \quad f_{d1} = 2 \dots 10 \text{ МГц}, \quad f_{d2} = 10 \dots 200 \text{ КГц}, \quad f_{d3} = 5 \dots 200 \text{ Гц}.$$

Таким образом, при каждом группировании частота дискретизации снижается на порядок и более.



КП - комплексный преобразователь частоты, НС - накапливающий сумматор, ГЛЧ - генератор литерных частот, ДКСН - дискриминатор канала слежения за несущей, ДКСЗ - дискриминатор канала слежения за задержкой, ГОС - генератор опорного сигнала ФК - фильтр Калмана.

Рис. 1

Возможность поэтапного группирования данных при обработке сигнала ГНСС обусловлена тем, что относительно измеряемого параметра – фазы сигнала, операции, производимые в дискриминаторе, являются линейными и, следовательно, подчиняются принципу суперпозиции.

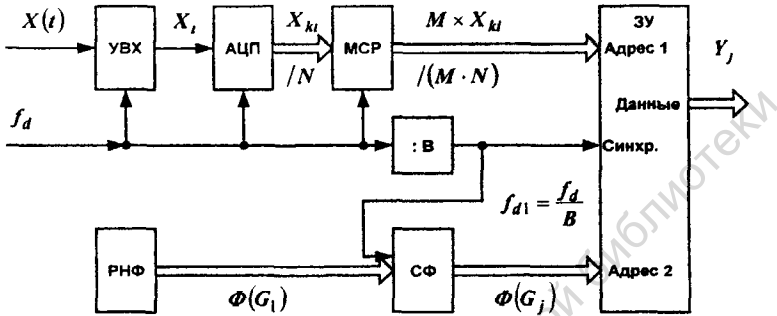
Предложено после выполнения второго группирования данных переводить обработку сигнала на программный уровень, где реализуется не только калмановская фильтрация, но и значительная часть функций дискриминатора. При этом сокращаются аппаратные затраты, а также обеспечивается оптимизация процедур обработки сигнала. В программной части формируется опорный сигнал (ОС), имеющий не только заданную фазу и доплеровский сдвиг частоты,

что характерно для аппаратной реализации генератора ОС, но и управляемый по производным фазы более высокого порядка, например, изменяющий свою частоту на интервале измерения. В этом случае, с учетом модели изменения фазы сигнала, используемой в фильтре Калмана, можно увеличить время когерентного накопления сигнала в дискриминаторе. При этом уменьшается погрешность измерения, обусловленная шумами в составе входного сигнала, и повышается помехоустойчивость аппаратуры. На рис. 1. приведена структурная схема цифрового измерителя параметров сигнала, реализующая перечисленные предложения. На схеме указаны частоты дискретизации f_{di} , с которыми работают различные блоки измерителя и показано, какие операции ЦОС выполняются в аппаратной, а какие в программной части.

Операцией, выполняемой с максимальной частотой $f_d = 45..80$ МГц, в схеме на рис.1 является преобразование частоты группового сигнала КА на ПЧ, с использованием квадратурного сигнала гетеродина, частота которого соответствует литерной частоте обрабатываемого КА на ПЧ (комплексное преобразование). Для реализации этой операции предложено использовать комбинаторный способ обработки сигнала [22]. В комбинаторной обработке используется тот факт, что на ограниченном интервале времени реализация случайного входного сигнала дискретизированного по времени и квантованного по уровню может принимать конечное число состояний (комбинаций)

Если $X(t)$ – случайный сигнал, $G(t)$ – детерминированный сигнал, а X_i и G_i – их выборки на интервале времени $T = M/f_d$ и необходимо получить значение функции $Y_j = \eta[X_i, G_i]$, $i = 1, \dots, M$, то такое функциональное преобразование может быть реализовано схемой представленной на рис. 2. Разрядность выборок X_{ki} на выходе АЦП – N , разрядность реализации на выходе много-разрядного сдвигового регистра (МСП) – $N \cdot M$. Здесь M – натуральное число, в том числе «1», $B \leq M$ – также натуральное число; при $B = 1$ $j = i$. Значение $B > 1$, если преобразование $Y(t) = \eta[X(t), G(t)]$ таково, что функция $Y(t)$ изменяется во времени медленнее чем $X(t)$, например, в B раз. В этом случае дан-

ные на выходе устройства комбинаторной обработки могут быть сгруппированы, например, путем суммирования отсчетов Y_i . Тогда $Y_j = \sum_{i=1}^B Y_i$.



УВХ - устройство выборки и хранения, АЦП - аналого-цифровой преобразователь, МСР - многоразрядный сдвиговый регистр, РНФ - регистр начальной фазы ОС, СФ - счетчик фазы, ЗУ - запоминающее устройство

Рис. 2

Требуемый объем памяти запоминающего устройства (ЗУ), содержащего вычисленные заранее все возможные результаты функционального преобразования $Y_j = \eta[X_i, G_i]$, зависит от типа реализуемого преобразования. Если детерминированный сигнал является постоянным $G(t) = const$, то требуемый объем ЗУ - $W1 = 2^{NM}$. Если $G(t)$ - периодический сигнал с частотой F_G , причем $C = \frac{f_d}{F_G \cdot B}$, требуемый объем ЗУ - $W2 = 2^{[NM + \log_2(C)]}$. Если необходимо использовать P типов периодических сигналов $G_p(t)$, то требуемый объем ЗУ - $W3 = 2^{[NM + \log_2(C) + \log_2(P)]}$.

Например, использованный в аппаратуре МРК-15 вариант комбинаторной схемы, выполняющей комплексное преобразование частоты сигналов для 31 литерной частоты ГЛОНАСС и 1 частоты GPS, имеет следующие параметры:

$N = 1$, $M = 8$, $B = M = 8$, $C = 16$, $P = 32$. Требуемый объем ЗУ – $W_3 = 2^{\lceil 8 + \log_2(16) + \log_2(32) \rceil} = 2^{\lceil 8 + 4 + 5 \rceil} = 2^{17} = 128 \text{ КБт}$.

Использование комбинаторной обработки позволяет с минимальными аппаратными затратами реализовать цифровой комплексный преобразователь частоты и в B раз уменьшить частоту выборок обрабатываемого сигнала.

Третья глава посвящена исследованию методов обработки сигналов, используемых в АПС, определяющей пространственную ориентацию (ПрО).

Известно, что минимизировать систематическую погрешность измерения разности фаз сигналов антенн, обусловленную неидентичностью каналов, позволяет обработка сигналов всех антенн АПС в общем аналоговом радиотракте [23]. Традиционно для такой обработки используется коммутационный метод, при котором выходные сигналы антенн поочередно подключаются к входу радиотракта. Погрешность измерения разности фаз между, например, первой и второй антеннами $\Delta\varphi_{(1,2)}$ для коммутационного метода:

$$\Delta\varphi_{(1,2)_{\text{ком}}} = \Delta\varphi_{Bx1} + \Delta\varphi_{Bx2} + \Delta\varphi_{z1} + \Delta\varphi_{z2} + \Delta\varphi_{(1,2)_{\text{ш}}},$$

где $\Delta\varphi_{Bx1}$ и $\Delta\varphi_{Bx2}$ – значения систематической погрешности, обусловленной неидентичностью фазовых характеристик входных цепей антенн до коммутатора; $\Delta\varphi_{z1}$ и $\Delta\varphi_{z2}$ – значения случайной погрешности, обусловленной шумами гетеродинов; $\Delta\varphi_{(1,2)_{\text{ш}}}$ – случайная погрешность, обусловленная шумами в составе сигналов антенн. Погрешность $\Delta\varphi_{(1,2)_{\text{ш}}}$ увеличена по сравнению с многоканальным измерителем, обрабатывающим сигналы антенн в параллельных каналах. Среднеквадратическая погрешность (СКП) $\sigma(\Delta\varphi_{\text{ш}})_{\text{ком}}$ для коммутационного метода связана с СКП многоканального измерения $\sigma(\Delta\varphi_{\text{ш}})_{\text{м}}$:

$$\sigma(\Delta\varphi_{\text{ш}})_{\text{ком}} = \sqrt{N} \cdot \sigma(\Delta\varphi_{\text{ш}})_{\text{м}},$$

где N – число коммутируемых антенн.

Разновременность наблюдений делает фазовые шумы гетеродинов некоррелированными для сигналов разных антенн, что также увеличивает погрешность измерения разности фаз. Кроме того, наличие перерывов в наблюдении сигнала увеличивает погрешность, вызванную изменением параметров.

Альтернативой коммутационному методу обработки сигналов в едином тракте является метод кодового разделения сигналов антенн. Схема реализации данного метода приведена на рис. 3.

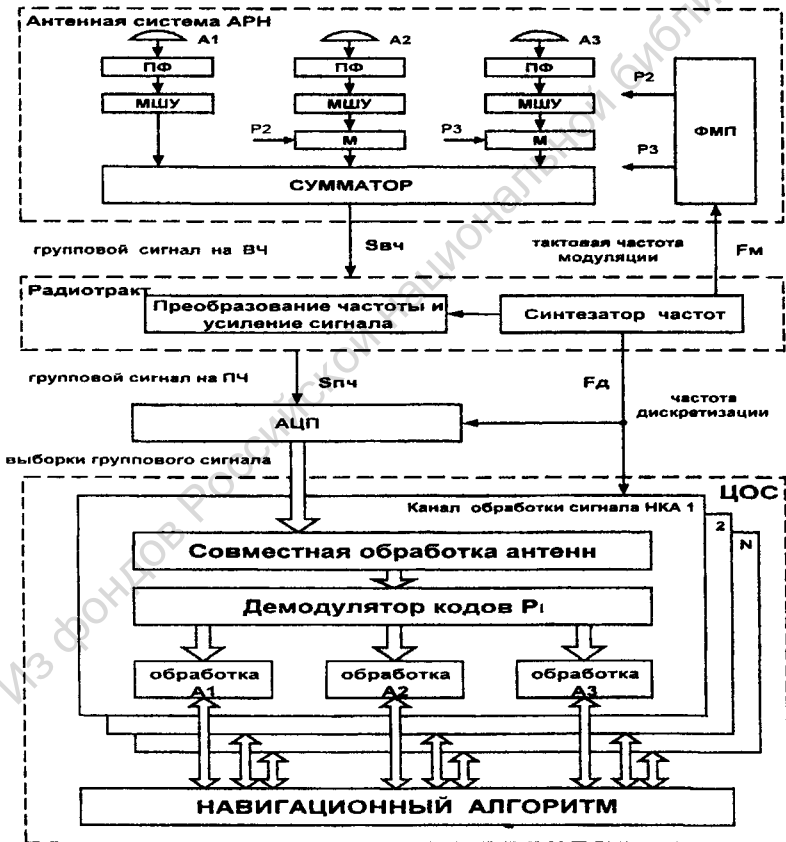


Рис. 3

В данной схеме для разделения сигналов антенн используется их кодирование, например фазовая манипуляция, взаимно-ортогональными последовательностями (кодами) Кодированные сигналы антенн суммируются в единый (групповой) сигнал и далее обрабатываются в общем аналоговом и цифровом тракте. Затем производится декодирование, после чего сигналы антенн обрабатываются отдельно. Погрешность измерения разности фаз для кодового метода разделения сигналов:

$$\Delta\varphi_{(1,2)код} = \Delta\varphi_{Вх1} + \Delta\varphi_{Вх2} + \Delta\varphi_{(1,2)ш} .$$

Кодовый метод обеспечивает одновременную обработку сигналов антенн. Фазовые шумы гетеродинов, влияющие на оценку фазы сигнала каждой антенны, оказываются коррелированными, и при вычислении разности фаз вычитаются. Погрешность, обусловленная изменением параметров, вследствие постоянного наблюдения сигнала КА каждой антенной, не увеличивается по сравнению с многоканальной аппаратурой. Для определения погрешности, обусловленной шумами в составе входного сигнала, проведен анализ преобразований сигналов при кодовом разделении.

$$\text{Сигналы антенн на выходах МШУ: } S_j = A_j \cdot \cos(2\pi f_j \cdot t + \varphi_j) + n_j ,$$

где: $- A_j, f_j, \varphi_j$ – амплитуда, частота и фаза сигнала S_j ;
 $- n_j$ – входной шум.

Амплитуду и частоту сигналов различных антенн можно считать постоянной, $A_j = A_c = const, f_j = f_c = const$. Спектральную плотность мощности шумов в составе входного сигнала n_j также примем равной для всех антенн. Шумы n_j являются некоррелированными, поскольку, в основном, определяются шумами МШУ.

Модулирующие сигналы P_1, P_2, \dots, P_N принимают значения ± 1 . Частота модуляции $f_k \ll f_c$. При этом

$$\begin{cases} P_i * P_j = \pm 1, & i \neq j \\ P_i * P_j \equiv 1, & i = j \end{cases}$$

Сигнал антенны с номером j на выходе модулятора:

$$S_j = P_j \cdot [A_j \cdot \cos(2\pi f_j \cdot t + \varphi_j) + n_j].$$

Сигнал на выходе сумматора.

$$S_{\Sigma} = P_1 \cdot [A_c \cdot \cos(2\pi f_c \cdot t + \varphi_1) + n_1] + P_2 \cdot [A_c \cdot \cos(2\pi f_c \cdot t + \varphi_2) + n_2] + \\ + \dots + P_N \cdot [A_c \cdot \cos(2\pi f_c \cdot t + \varphi_N) + n_N].$$

На выходе соответствующего демодулятора сигнал любой, например, первой антенны, с учетом того, что $P_1 \cdot P_1 \equiv 1$ имеет вид

$$S_{D1} = [A_c \cdot \cos(2\pi f_c \cdot t + \varphi_1) + n_1] + P_1 \cdot P_2 \cdot [A_c \cdot \cos(2\pi f_c \cdot t + \varphi_2) + n_2] + \\ + \dots + P_1 \cdot P_N \cdot [A_c \cdot \cos(2\pi f_c \cdot t + \varphi_N) + n_N].$$

Сигнал S_{D1} перемножается на опорный сигнал, частота которого равна частоте полезного сигнала, т.е. происходит перенос на нулевую частоту

$$S_{01} = [A_c \cdot \cos(\varphi_1) + n_1] + P_1 \cdot P_2 \cdot [A_c \cdot \cos(\varphi_2) + n_2] + P_1 \cdot P_N \cdot [A_c \cdot \cos(\varphi_N) + n_N].$$

Компоненты $A_c \cdot \cos(\varphi_j)$ представляют собой полезный сигнал антенны.

Для выделения полезного сигнала первой антенны выполняется интегрирование на интервале времени T . На выходе интегратора:

$$S_{H1} = \int_0^T S_{01} = \int_0^T \{A_c \cdot \cos(\varphi_1) + n_1\} dt + \int_0^T \{P_1 \cdot P_2 \cdot [A_c \cdot \cos(\varphi_2) + n_2]\} dt + \\ + \dots + \int_0^T \{P_1 \cdot P_N \cdot [A_c \cdot \cos(\varphi_N) + n_N]\} dt.$$

На интервале интегрирования произведение $P_1 P_j$ принимает значение «+1» и «-1» одинаковое число раз, что обусловлено свойствами кодирующих последовательностей. С учетом этого, выражение для S_{H1} :

$$S_{H1} = \int_0^T S_{01} = \int_0^T \{A_c \cdot \cos(\varphi_1) + n_1\} dt + \int_0^{T/2} A_c \cdot \cos(\varphi_2) dt - \int_{T/2}^T A_c \cdot \cos(\varphi_2) dt + \int_0^T n_2 dt + \\ + \dots + \int_0^{T/2} A_c \cdot \cos(\varphi_N) dt - \int_{T/2}^T A_c \cdot \cos(\varphi_N) dt + \int_0^T n_N dt.$$

При совпадении частот входного и опорного сигналов, что имеет место в режиме измерения параметров сигнала, $\cos(\varphi_j) = \text{const}$, следовательно:

$$S_{H1} = \int_0^T A_c \cdot \cos(\varphi_1) dt + \int_0^T (n_1 + n_2 + \dots + n_N) dt.$$

Увеличение шумов на выходе интегратора канала первой антенны за счет суммирования с кодовым разделением сигналов N дополнительных антенн составит: $\Delta n = n_2 + \dots + n_N$. Поскольку n_j – некоррелированные шумы с одинаковой дисперсией, то дисперсия суммарного шума на выходе интегратора возрастает в N раз. Аналогичный вывод можно провести и для других антенн. Таким образом, при суммировании сигналов N антенн с кодовым разделением отношение сигнал/шум в выделенном по коду сигнале любой из антенн ухудшается в \sqrt{N} раз. Погрешность измерения разности фаз, обусловленная шумами: $\sigma(\Delta\varphi_{ш})_{код} = \sqrt{N} \cdot \sigma(\Delta\varphi_{ш})_м$, что соответствует аналогичному значению для коммутационного метода. Уменьшение данной погрешности достигается увеличением времени накопления сигнала в дискриминаторах и постоянной времени следящих фильтров. Однако такой метод применим только для неподвижных объектов, или объектов движущихся с малыми скоростями и ускорениями.

Для уменьшения погрешности измерения разности фаз на маневренных объектах предложено выделить одну из антенн в качестве основной, остальные считать дополнительными и изменить соотношение коэффициентов передачи трактов основной и дополнительных антенн до суммирования в единый сигнал. Увеличение коэффициента передачи по основной антенне в K раз, по сравне-

нию с дополнительными антеннами, приводит к тому, что ухудшение отношения сигнал/шум при использовании кодового метода, по основной антенне со-

ставит $\frac{\sqrt{K^2 + N - 1}}{K}$, а по дополнительным $\sqrt{K^2 + N - 1}$. Обработка сигнала

основной антенны производится, практически, без потерь (≈ 1 дБ), как для аппаратуры с одной антенной. Результаты измерения фазы по основной антенне используются в качестве априорной информации в фильтрах сигналов дополнительных антенн, постоянная времени которых должна быть увеличена, например в K раз. Предложенный подход обеспечивает работу аппаратуры при движении объекта со значительными скоростями и ускорениями, что существенно расширяет сферу применения АПС.

Четвертая глава содержит результаты экспериментальных исследований выполненных на разработанной приемной аппаратуре и их анализ. Результаты диссертационной работы использованы в ряде моделей фазовой АПС ГЛО-НАСС/GPS внедренных в серийное производство.

Тип АПС	Назначение
МРК-11	Определение пространственной ориентации подвижных станций радиосвязи и радиолокации с погрешностью 3...20 угл. минут на базе 5...1 м. Формирует аппаратную метку времени с погрешностью 1 мкс и сигнал 10 МГц с погрешностью $1 \cdot 10^{-9}$. Обеспечивает работу от внешнего опорного генератора.
МРК-15	Оборудование наземных подвижных объектов. Обеспечивает измерение координат, скорости и направления движения, а также формирование аппаратного сигнала метки времени.
МРК-17	Функционирование в составе автоматизированных информационно-управляющих комплексов. Обеспечивает измерение координат, скорости и направления движения.
МРК-19Л	Функционирование в составе навигационно-информационного комплекса автоматизированной системы управления железнодорожным движением «Магистраль». Обеспечивает определение местоположения состава на

	трасе в путевой системе координат и передачу информации в диспетчерский центр по каналу подвижной радиосвязи.
МРК-23	Использование в системах связи, а также для высокоточной синхронизации удаленных опорных генераторов. Погрешность синхронизации от 30 до 300 нс по времени и от $1 \cdot 10^{-12}$ до $1 \cdot 10^{-10}$ по частоте. Формирует высокостабильные сигналы 5МГц, 10 МГц и может использоваться в качестве стандарта частоты. Обеспечивает работу от внешнего опорного генератора 5МГц или 10 МГц.

Эксперименты по определению погрешности измерения фазы сигнала КА в разработанной аппаратуре показали, что случайная составляющая погрешности, обусловленная шумами в составе входного сигнала, составляет $3 \dots 5^\circ$.

При измерении разности фаз между антеннами наибольший вклад в суммарную величину погрешности вносят неидентичность фазовых характеристик приемных антенн, а также интерференция прямого сигнала и сигналов, отраженных от мешающих предметов в месте приема. Эти факторы в несколько раз превосходят погрешность, обусловленную шумами измерения, и составляют $12 \dots 25^\circ$. Для уменьшения погрешности определения пространственной ориентации должен производиться подбор антенн с идентичными фазовыми характеристиками.

При измерении разности групповой и фазовой задержек сигнала, возникающей при прохождении сигнала через ионосферу, получена случайная составляющая погрешности в десятки пикосекунд.

Основные результаты проделанной работы заключаются в следующем:

1. Разработаны методы обработки сигналов КА, позволяющие повысить точность и помехоустойчивость приемной аппаратуры СРТС.
2. Разработан метод измерения разности фаз сигналов КА, принятых разнесенными в пространстве антеннами, с погрешностью в единицы градусов.
3. Разработаны методы построения цифровой фазовой аппаратуры, позволяющие уменьшить аппаратурные затраты и реализовать АПС с высокими эксплуатационными характеристиками.

тационными, массогабаритными и стоимостными характеристиками без применения специализированных заказных БИС.

Разработанные способы и устройства на их основе внедрены в промышленности, что подтверждается актами внедрения. Способы и устройства защищены патентами РФ.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1 В устройствах оптимальной нелинейной фильтрации параметров сигнала, состоящих из дискриминатора и оптимального линейного фильтра, с целью уменьшения тактовых частот отдельных узлов измерителя следует производить группирование данных на интервалах, длительность которых определяется временем корреляции измеряемых параметров. Группирование может быть выполнено неоднократно на различных этапах цифровой обработки сигнала.

2 Комбинаторная обработка сигналов, примененная в АПС для выполнения преобразования частоты, может быть эффективно использована в других устройствах ЦОС. Данный подход имеет хорошие перспективы по замене специализированных БИС функциональных преобразователей.

3. При реализации цифровой обработки сигнала с использованием многократного группирования данных для сокращения аппаратных затрат и оптимизации процедур обработки, следует переводить обработку сигнала на программный уровень. Такой подход позволяет отказаться от аппаратной реализации управляемого генератора опорного сигнала (ГОС) и использовать более сложные модели управления опорным сигналом, в частности, изменять частоту ГОС в процессе измерения. Таким образом, все параметры сигнала, оцениваемые фильтром Калмана в соответствии с моделью их эволюции, находят свое отражение в опорном сигнале. В результате обеспечивается увеличение времени когерентного накопления сигнала в дискриминаторе, что приводит к повышению помехоустойчивости аппаратуры.

4. В АПС, определяющей пространственную ориентацию, где большие значения систематической погрешности измерения разности фаз между сигналами недопустимы, для создания практически реализуемой и экономически эффективной аппаратуры необходимо обрабатывать сигналы нескольких антенн в едином тракте. При этом кодовое разделение сигналов антенн имеет ряд преимуществ по сравнению с коммутационным методом обработки сигналов в едином тракте. Изменение соотношения коэффициентов передачи по основной и дополнительным антеннам, при одновременном увеличении времени накопления в каналах измерения фазы дополнительных антенн, обеспечивает уменьшение случайной составляющей погрешности разности фаз.

5. В направлении дальнейших исследований по уменьшению погрешности измерения фазы сигнала в АПС представляется перспективным использование инерциальных датчиков, например, акселерометров. При этом можно применять датчики с низкой чувствительностью, информирующие о больших значениях ускорений, а изменения параметров в результате медленных маневров АПС отслеживает самостоятельно.

6. Результаты проделанной работы открывают возможности для исследования применения в АПС антенных решеток, формирующих максимумы диаграммы направленности на КА, которое может быть оптимизировано при комплексном использовании информации об измеренной пространственной ориентации, и реализации управляемых фазовращателей не в диапазоне СВЧ, а на цифровом или даже программном уровне, с использованием кодового метода разделения сигналов антенн.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Гребенников А.В., Чмых М.К. Статистические характеристики погрешности многократного квантования временных интервалов // Интерприбор-90: Тез. докл. международной конференции - Москва, -1990.
2. Гребенников А.В., Дергант А.В., Новиков В.Б., Чмых М.К. Алгоритм оценки доплеровского сдвига частоты для мультиплексного приемника СРНС //

Проблемы техники и технологии XXI века: Тез. докл. научно-технической конференции с международным участием - Красноярск. -1994.

3 Гребенников А.В., Кокорин В.И., Новиков В.Б., Сушкин И.Н., Фатеев Ю.Л., Чепурных С.В., Чмых М.К. Многофункциональная мультиплексная аппаратура, работающая по сигналам СРНС ГЛОНАСС // Проблемы техники и технологии XXI века: Тез. докл. научн.-техн. конф. - Красноярск, -1994.

4. Гребенников А.В., Новиков В.Б., Чепурных С.В., Чмых М.К. Особенности построения мультиплексного приемоиндикатора СРНС // Проблемы техники и технологии XXI века: Тез. докл. научн.-техн. конф. - Красноярск, -1994.

5. A.V.Grebennikov, V.I.Kokorin, V.B.Novikov, I.N.Sushkin. Multifunctional receiver-indicator for the radionavigation system glonass // Second international conference on development directions of the radio communication systems and means – Voronezh, -1995.

6. Гребенников А.В., Кокорин В.И., Новиков В.Б., и др. Многофункциональный приемоиндикатор радионавигационной системы ГЛОНАСС // Современное состояние, проблемы навигации и океанографии - Санкт-Петербург, -1995.

7. Гребенников А.В., Кокорин В.И., Новиков В.Б., и др. Многофункциональный приемоиндикатор системы ГЛОНАСС // Планирование глобальной радионавигации: Сб. трудов международной конференции - Москва. -1995.

8. Авсиевич В.Н., Гребенников А.В., Кокорин В.И., Новиков В.Б. и др. Аппаратура определения пространственной ориентации объектов // Спутниковая связь: Сб. трудов конференции - Москва. -1996.

9. Васекин А.И., Гребенников А.В., Кокорин В.И., Новиков В.Б. и др. Результаты испытаний приемоиндикатора спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС на железной дороге // Планирование глобальной навигации: Сб. трудов международной конференции - Москва. -1997.

10 Гребенников А.В., Чмых М.К. Цифровые корреляторы с расширенным частотным диапазоном // Достижения науки и техники – развитию города Красноярска: Тез. докл. научно-техн. конференции - Красноярск, 1997.

11 Авсиевич В.Н., Гребенников А.В., Кокорин В.И., Новиков В.Б. и др. Определение пространственной ориентации объектов по сигналам системы ГЛО-

НАСС // Проблемы и технологии создания и использования космических систем и комплексов на базе малых КА и орбитальных станций Сб. трудов конференции - Москва. -1998.

12. Авсиевич В.Н., Гребенников А.В., Кокорин В.И., Новиков В.Б. и др. Аппаратура определения пространственной ориентации объектов // Радиолокация, навигация и связь: Сб. трудов международной конференции – Воронеж. -1998

13. Авсиевич В.Н., Гребенников А.В., Кокорин В.И., Новиков В.Б. и др. Опыт создания и перспективы развития аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем // Радиолокация, навигация и связь: Сб. трудов международной конференции – Воронеж. -1999.

14. Борсоев В.А., Гребенников А.В., Кокорин В.И., Подлесный С.А. и др. Приемная аппаратура спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS для использования на воздушных судах гражданской авиации // Достижения науки и техники – развитию сибирских регионов: Материалы Всероссийской научно-практической конференции - Красноярск. -1999.

15. Гребенников А.В., Кокорин В.И., Попов В.Н., Рагзин Г.М. и др. Многофункциональные навигационные приемники систем ГЛОНАСС и GPS – опыт разработки и производства // Достижения науки и техники – развитию сибирских регионов: Материалы Всероссийской научно-практической конференции - Красноярск, -1999.

16. Борсоев В.А., Гребенников А.В., Коротков А.Г., Михайлов А.В. и др. Результаты испытаний навигационной аппаратуры и средств радиосвязи на трансполярных трассах // Достижения науки и техники – развитию сибирских регионов: Материалы Всероссийской научн.-практ. конф. – Красноярск, -1999.

17. Авсиевич В.Н., Гребенников А.В., Кокорин В.И., Новиков В.Б. и др. Опыт создания и перспективы развития навигационной аппаратуры ГЛОНАСС/GPS // Достижения науки и техники – развитию сибирских регионов: Материалы Всероссийской научно-практической конференции – Красноярск, -1999.

18. Гребенников А.В., Кокорин В.И., Новиков В.Б., Сушкин И.Н. и др. Опыт использования аппаратуры МРК-23 в системах синхронизации // Достижения

науки и техники – развитию сибирских регионов: Материалы Второй Всероссийской научно-практической конференции – Красноярск, -2000.

19 Авсиевич В.Н., Гребенников А.В., Кокорин В.И., Новиков В.Б. и др. Опыт создания и перспективы применения аппаратуры потребителей глобальных спутниковых навигационных систем // VII Санкт-Петербургская международная конф. по интегрированным навигационным системам - С-Петербург, -2000

20. Гребенников А.В., Казанцев М.Ю. Исследование возможности интеграции угломерной навигационной аппаратуры потребителя спутниковых навигационных систем и акселерометрических датчиков // Навигация и управление движением: Тезисы науч.-техн. конф. - Санкт-Петербург, -2000.

21. Патент РФ № 2089920. Цифровой измеритель фазового сдвига. / Авсиевич В.Н., Гребенников А.В., Чмых М.К. Оpubл. 10.09.97 Бюл. №25.

22. Патент РФ №2099721. Способ измерения фазового сдвига и устройство для его осуществления. / Авсиевич В.Н., Гребенников А.В., Новиков В.Б., Чмых М.К. Оpubл. 14.08.98 Бюл. №40.

23. Патент РФ №2099732. Пеленгатор. / Гребенников А.В., Кокорин В.И., Сушкин И.Н., Чмых М.К. Оpubл. 20.12.97 Бюл. №35.

24 Патент РФ №2139215. Система контроля положения подвижного железнодорожного состава. / Болдырев В.И., Васекин А.И., Гребенников А.В., Кокорин В.И. и др. Оpubл. 10.10 99. Бюл. №28.

25. Патент РФ № 2145423. Способ определения координат подвижных объектов, например, железнодорожных поездов. / Болдырев В.И., Васекин А.И., Гребенников А.В., и др. Оpubл. 10.02 2000 Бюл. №4.

СОИСКАТЕЛЬ:

Тираж 100 экз. Заказ №477

Отпечатано в типографии КГТУ

660074, Красноярск, ул. Киренского 26

Из фондов Российской национальной библиотеки

Из фондов Российской национальной библиотеки

■-7993

A2000

7993

Из фондов Российской национальной библиотеки