

На правах рукописи

Шарыпов Алексей Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
ОШИБОК МНОГОЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
В СИСТЕМЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ ПОСАДКИ**

Специальность: 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

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

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Юрченко Юрий Семенович

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук, профессор  
Зиатдинов Сергей Ильич  
кандидат технических наук  
Коротков Андрей Николаевич

Ведущая организация: Филиал ОАО Всероссийский  
научно-исследовательский институт  
радиоаппаратуры (ВНИИРА)  
ЗАО «ВНИИРА-Навигатор»

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г. в \_\_ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.03 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь совета по защите  
докторских и кандидатских диссертаций

Баруздин С.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В соответствии с планами международной организации гражданской авиации спутниковые навигационные системы должны стать основным средством навигации в авиации. Дифференциальный режим работы аппаратуры потребителей позволяет реализовать высокоточный режим навигации и посадки воздушных судов (ВС). Для этого аппаратура потребителей глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), состоящей из систем GPS и ГЛОНАСС, используется совместно с локальными системами функционального дополнения – локальными контрольно-корректирующими станциями (ЛККС). ЛККС вырабатывает дифференциальные поправки, выполняет функции контроля работоспособности навигационных спутников и вырабатывает информацию о целостности и точности.

Для решения задачи контроля целостности в наземной и бортовой аппаратуре должны контролироваться ошибки измерений, создаваемых в основном шумовыми помехами и многолучевым распространением (МЛР) сигналов, и вырабатываться оценки дисперсии ошибок измерения псевдодальностей в ЛККС и бортовом приемнике. При посадке ВС должно удерживаться в коридоре, который определяется допустимыми ошибками. При выходе за границы ошибок пилот должен получать предупреждение о потере целостности навигационных измерений.

В технических требованиях на систему инструментальной посадки ВС отсутствуют рекомендации по методам оценивания ошибок МЛР и дисперсии ошибок дифференциальных поправок, поэтому актуальной является проблема контроля величины дисперсии ошибок МЛР в оборудовании ЛККС и бортовом приемнике ВС.

Известные методы измерения дисперсии ошибок МЛР основаны на длительных наблюдениях и требуют использования узкополосных фильтров с большими постоянными времени. При этом отбрасывается низкочастотная составляющая ошибки МЛР. Подобные методы могут использоваться на ЛККС благодаря периодическому повторению помех МЛР для построения карты помех, однако они не пригодны для оперативной оценки ошибок МЛР на борту маневрирующего ВС. Ограниченность известных алгоритмов обуславливает актуальность разработки новых методов оценивания и прогнозирования дисперсии ошибок МЛР при комплексной фильтрации навигационных данных,

которые учитывают низкочастотную составляющую ошибки МЛР и могут быть применены как в ЛККС, так и на борту ВС.

**Цель работы.** Целью диссертационной работы является исследование и разработка методов измерения и прогнозирования ошибок МЛР в системе инструментальной посадки ВС с использованием ГНСС.

**Основные методы исследования.** Для решения поставленной задачи применялись методы статистической радиотехники и статистической теории радионавигации, математического и статистического моделирования. Экспериментальные исследования выполнены методом полунатурного и натурного моделирования с использованием записей реальных сигналов навигационных приемоизмерителей в ГНСС.

**Научная новизна.** Решение поставленных задач в диссертационной работе определило научную новизну исследования, которую составляют:

- метод оценивания ошибок МЛР, использующий двухканальный измеритель отношения сигнал-шум (ОСШ) и позволяющий, в отличие от известных методов, выявить низкочастотную компоненту ошибок многолучевости;
- установленная зависимость сдвига доплеровской частоты отраженного сигнала от его задержки при различном положении приемника относительно плоскости орбиты спутника;
- показано, что использование кодо-фазового фильтра для измерений псевдодальности в приемнике спутниковой системы снижает эффективность коррелятора со специальной формой стробов, предназначенного для борьбы с ошибками МЛР; при этом различие спектров ошибок МЛР на выходе кодо-фазового фильтра для режимов работы системы слежения за задержкой сигнала с узким коррелятором и коррелятором со специальной формой стробов несущественно;
- показано, что использование кодо-фазового фильтра уменьшает различие ошибок МЛР в каналах стандартной точности (СТ) систем GPS и ГЛОНАСС;
- даны рекомендации для формирования базы данных объемного распределения прогнозируемой дисперсии ошибок МЛР для системы ГЛОНАСС в ЛККС;
- предложен метод прогнозирования пространственной области возможного возникновения низкочастотной компоненты ошибок МЛР в бортовом приемнике ВС.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- оценку ошибки МЛР можно получить с помощью специального двухканального измерителя ОСШ;
- сдвиг доплеровской частоты отраженного сигнала зависит от его задержки и направления прихода;
- результат комплексной фильтрации измерений псевдодальности в аппаратуре потребителя спутниковой системы подобен применению коррелятора со специальной формой строга;
- прогнозирование положения области пространства, создающей низкочастотные ошибки МЛР можно реализовать на основе эфемеридного расчета в аппаратуре потребителя систем GPS и ГЛОНАСС;
- ширина спектра ошибок МЛР зависит от длительности элементарного символа кода. Интенсивность спектра ошибок МЛР в области низких частот почти не зависит от длительности элементарного символа кода.

**Практическая ценность** заключается в решении задач оценивания и прогнозирования дисперсии ошибок МЛР при комплексной фильтрации навигационных данных в ЛККС и на борту ВС при категорированном заходе на посадку с помощью ГНСС.

**Достоверность результатов** работы подтверждается аналитическими расчетами, данными полунатурного и натурного моделирования.

**Внедрение результатов** работы осуществлено на ЗАО «ВНИИРА–Навигатор» (г. Санкт-Петербург) при разработке наземного и бортового оборудования спутниковой системы посадки, предназначенного для повышения безопасности посадки летательных аппаратов на аэродромах, оборудованных ЛККС.

**Апробация работы** Основные положения диссертационной работы представлялись и обсуждались на:

- 61 – 65-й научно-технических конференциях, посвященных Дню радио, С.-Петербург, СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2006 – 2010 гг.;
- 9-й конференции молодых ученых "Навигация и управление движением", С.-Петербург, ГНЦ ЦНИИ "Электроприбор", 2007 г.;
- научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2007 – 2010 гг.

**Публикации.** Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 7 работах, среди которых 2 статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных перечнем ВАК и 5 публикаций в материалах конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав с выводами и практическими рекомендациями, заключения, изложена на 130 страницах машинописного текста, включает 77 рисунков, 1 таблицу, и содержит библиографический список из 44 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** определено направление исследований, обоснована их актуальность, сформулирована цель диссертационной работы, отмечена её практическая значимость.

**В первой главе** проведен обзор принципов построения спутниковой системы инструментальной посадки и использования ЛККС в задаче контроля целостности, на основании которого показано, что основными ошибками дифференциальных поправок являются ошибки МЛР и шумы кодовых измерений псевдодальности на ЛККС и на борту ВС. При этом в соответствии с техническими требованиями на систему инструментальной посадки ВС для контроля целостности необходимо выполнять оценивание дисперсий ошибок дифференциальных поправок и ошибок измерения координат на борту ВС. В то же время, отсутствуют рекомендации способов определения дисперсий этих ошибок и в частности, ошибок МЛР в наземном и бортовом оборудовании посадки.

Известные методы измерения дисперсии ошибок МЛР основаны на длительных наблюдениях и требуют использования узкополосных фильтров с большими (сотни секунд) постоянными времени. Подобные методы могут использоваться на ЛККС благодаря периодическому повторению помех МЛР для построения "карты помех", однако они не пригодны для оперативной оценки ошибок МЛР на борту маневрирующего ВС.

В связи с перспективой использования спутниковой информации в системах посадки II и III категории возрастают требования к контролю целостности навигационных измерений. При этом в современном спутниковом оборудовании начинает широко внедряться комплексирование с инерциальными навигационными средствами.

Рассмотренные в главе метод измерения ошибки МЛР с помощью полосового фильтра и корреляционный метод позволяют оценивать и прогнозировать только дисперсию наземной ошибки МЛР в ЛККС. При этом отбрасывается низкочастотная со-

ставляющая ошибки МЛР. Кроме того, корреляционный метод выделяет лишь сильно коррелированную составляющую ошибки МЛР и позволяет оценить ошибку МЛР только при наличии единственного источника помех.

На основании проведенного обзора известных методов измерения ошибки МЛР и технических требований на систему инструментальной посадки ВС были обозначены следующие задачи настоящего исследования:

- разработка новых методов оценивания и прогнозирования дисперсии ошибок МЛР при комплексной фильтрации навигационных данных, которые учитывают низкочастотную составляющую ошибки МЛР;
- исследование спектра ошибок МЛР в спутниковой навигационной системе;
- исследование влияния комплексной обработки сигналов на ошибки МЛР;
- разработать методы определения и прогнозирования дисперсии ошибок МЛР, которые могут применяться как в ЛККС, так и на борту ВС.

**Во второй главе** предложен специальный измеритель ошибки МЛР на основе измерений ОСШ, а также проведен расчет точности предложенного метода измерения ошибки МЛР.

Измерение ОСШ, выдаваемое навигационным приемником, используется для расчета шумовой составляющей измерений псевдодальности при оценке целостности и в обычных измерителях сильно подвержено МЛР. Опираясь на технику использования корреляторов со специальной формой строба в схеме слежения за задержкой кода (ССЗК), оценку ошибки МЛР можно получить на основе сопоставления оценок ОСШ, вычисленных при установке стробов коррелятора по переднему и заднему фронту элементарного символа дальномерного кода.

В современных навигационных приемниках для повышения точности используются так называемые "узкие" корреляторы, широкополосные приемные тракты и предлагаются различные методы борьбы с МЛР, связанные с усложнением формы стробов навигационного приемника. В ССЗК с узким коррелятором ошибка, создаваемая МЛР, практически не зависит от задержки отраженного сигнала. Если использовать узкий строб коррелятора, установленный по переднему фронту одного элементарного символа, оценка ОСШ меньше зависит от помех МЛР по сравнению с оценкой, формируемой обычным измерителем с широким стробом. Предполагая, что сигналы МЛР  $S(\tau)$  по

времени всегда запаздывают и их мощность меньше мощности "прямого" сигнала  $C$ ,

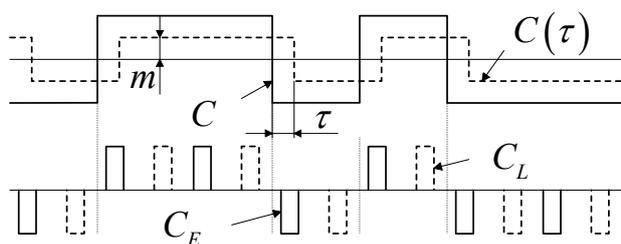


Рис.1. Привязка стробов измерителя к элементам принимаемого сигнала  $C$  и отраженного сигнала  $C(\tau)$

можно снизить влияние многолучевости на оценку ОСШ путем установки опережающего узкого строба коррелятора  $C_E$  по переднему фронту элементарного символа сигнала  $C$  (рис.1). Оценка ОСШ, формируемая с помощью коррелятора с задержанным узким стробом  $C_L$ , подвержена влиянию помех МЛР. Сравнивая оценки  $C_E$  и  $C_L$ , можно определить мощность сигналов МЛР.

Проведенное моделирование метода измерения оценок ОСШ от относительного уровня сигнала МЛР  $m$  и его задержки  $\tau$  показало, что при задержке МЛР в пределах  $\tau = 0.2 \div 1$  элементарного символа кода, стробовый измеритель формирует оценку  $\widehat{SNR}_E$ , не зависящую от уровня МЛР (рис.2а). Пока ошибки МЛР находятся в диапазоне от  $\tau = 0 \div 0.8$  элементарного символа кода, измеритель оценки  $\widehat{SNR}_L$  формирует оценку смеси сигнала с ошибками МЛР, которая не зависит от их задержки (рис.2б). Незначительная нелинейность оценки  $\widehat{SNR}_L$  от  $m$  в области  $m > 0.4$  объясняется смещением нуля дискриминационной характеристики следящей системы, которое можно снизить путем усложнения формы строба.

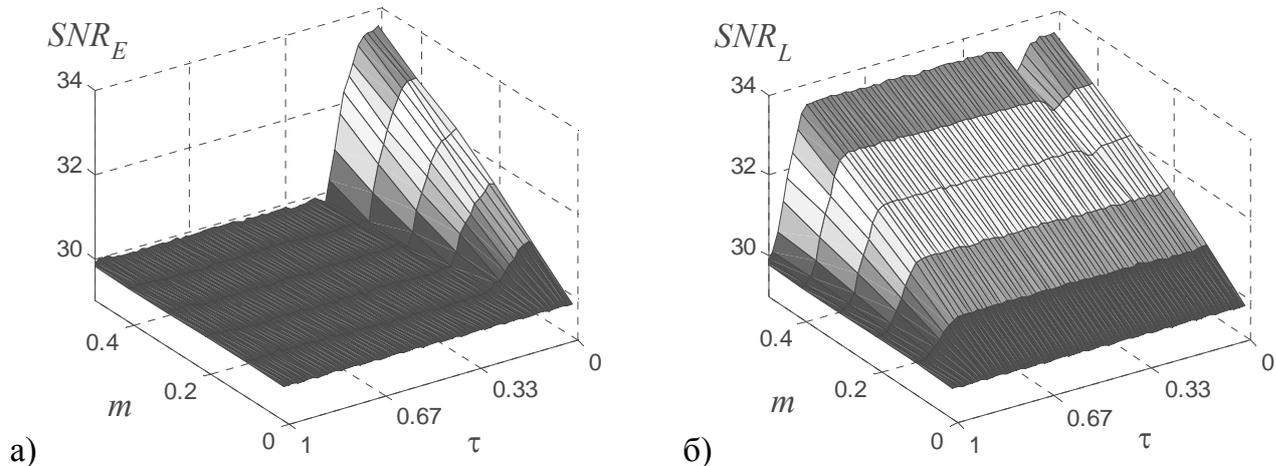


Рис.2 Зависимость оценок ОСШ от уровня сигнала МЛР и его задержки

Суммарная относительная ошибка измерения уровня МЛР  $\sigma$  для предложенного специального измерителя составляет:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2M} \left( \frac{1}{SNR_L} + \frac{1}{SNR_E} \right) + \frac{1}{8M(M-1)} \left( \frac{1}{SNR_L^2} + \frac{1}{SNR_E^2} \right)}, \quad (1)$$

где  $M$  – число отсчетов квадратурных составляющих в корреляторе навигационного приемника. Приращение амплитуды из-за действия помехи МЛР можно представить в виде  $m' = A_{\Sigma}/A - 1$ , где  $A_{\Sigma}$  – амплитуда суммы полезного сигнала  $A$  и сигнала МЛР. На рис.3 показан результат расчета относительной ошибки измерения  $\sigma$  от уровня МЛР для  $M = 20$ ,  $n = 10$ ,  $m' = -0.5 \div 0.5$  и коэффициента потерь  $x = 2$ .

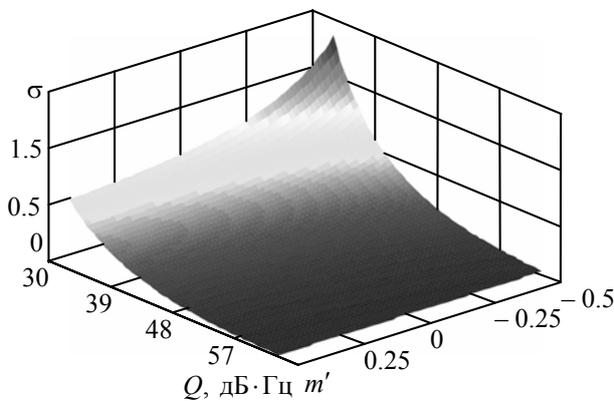


Рис.3 Суммарная относительная ошибка измерения уровня МЛР

Вычисление  $SNR$  выполнялось по формуле  $SNR = Q \cdot T/x$ , где  $Q$  – энергетический потенциал,  $T$  – время накопления, равное 1 мс. Наибольший вклад в относительную ошибку измерения (1) вносит составляющая, соответствующая стробу, установленному по заднему фронту элементарного символа кода.

Показана возможность реализации измерителя ошибок МЛР на основе сравнения оценок ОСШ, вычисленных по переднему и заднему фронту элементарного символа дальномерного кода. Показано, что суммарная относительная ошибка измерения уровня МЛР составляет не более 0.017 при уровне энергopotенциала  $60 \text{ дБ} \cdot \text{Гц}$ , а в области значений энергopotенциала меньше  $40 \text{ дБ} \cdot \text{Гц}$  резко возрастает до 0.5 при уровне сигнала МЛР 0.5 и 1.5 при уровне сигнала МЛР -0.5. Точность измерения уровня МЛР можно повысить путем увеличения точности оценки мощности шума с использованием измерений всех каналов навигационного приемника. Предложенный измеритель в области больших значений ОСШ позволяет формировать оценку уровня помехи МЛР, которая не зависит от их задержки, если они имеют задержку больше ширины строба измерителя и уровень меньше полезного сигнала.

В предложенном измерителе ошибок МЛР использование узких стробов коррелятора приводит к потерям в измерении ОСШ по сравнению с обычным измерителем. При длительности узкого строба коррелятора  $1/n$  от длительности элементарного символа кода, значение ОСШ падает в  $n$ -раз. Для уменьшения инструментальной погрешности следует использовать усреднение после измерения.

Преимущество предлагаемого метода заключается в возможности измерения ошибки при низкой или нулевой частоте ошибки МЛР, при которой нельзя использовать методы измерения ошибки МЛР полосовым фильтром и корреляционным методом.

Недостатком предложенного способа измерения уровня сигналов МЛР является необходимость изменения конструкции приемника и невозможность получения эффективной оценки при наличии сигналов МЛР с задержками, меньшими длительности узкого строба коррелятора  $C_E$ .

**В третьей главе** проведена оценка влияния комплексной фильтрации на оценки псевдодалности путем исследования спектра ошибок МЛР. Предложен метод расчета сдвига доплеровских частот ошибок МЛР на ЛККС для систем GPS и ГЛОНАСС. Проведена оценка влияния скорости вращения Земли на уровень ошибок МЛР, исследовано влияние смещения приемника потребителя относительно плоскости орбиты спутника на ошибки МЛР, выполнен расчет по оценке диффузионной составляющей ошибки МЛР для систем GPS и ГЛОНАСС.

Для исследования спектра ошибок МЛР был рассмотрен случай расположения приемника П в плоскости орбиты спутника С. Было показано, что в аппаратуре потреби-

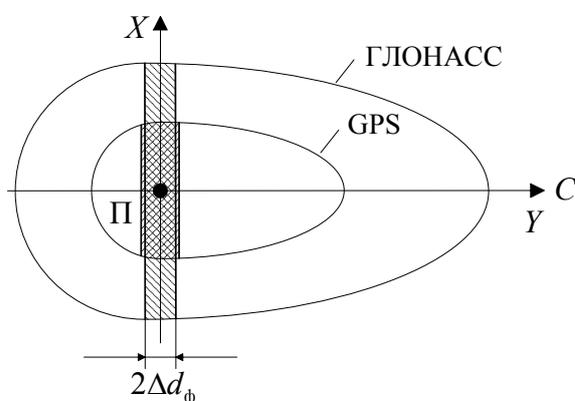


Рис.4 Область поверхности, создающая ошибки МЛР, при комплексной фильтрации

теля с комплексной фильтрацией измерений псевдодалности, применение комплексного фильтра сводит форму области поверхности, создающей ошибки МЛР, к полосе, ширина которой  $\Delta d_\phi$  определяется полосой пропускания комплексного фильтра (рис.4). На рисунке система координат  $XOY$  расположена так, что оси  $X$  и  $Y$  расположе-

ны по касательным к поверхности Земли с центром в точке 0.

В результате площади областей, создающих существенные ошибки МЛР при комплексной фильтрации, в канале стандартной точности систем ГЛОНАСС и GPS различаются не в четыре раза, а в  $1.5 \div 1.8$  раза.

Анализ зависимости ошибки МЛР от задержки помехи при кодо-фазовой фильтрации показал, что при малых углах места спутника  $\varphi < 20^\circ$  наиболее опасны сигналы, отраженные от местных предметов типа вертикальной стены. Значение сдвига доплеровских частот для таких сигналов невелико ( $0.01 \div 0.03$  Гц для GPS и  $0.02 \div 0.07$  Гц для ГЛОНАСС) и эффективность комплексной фильтрации ошибок МЛР снижается.

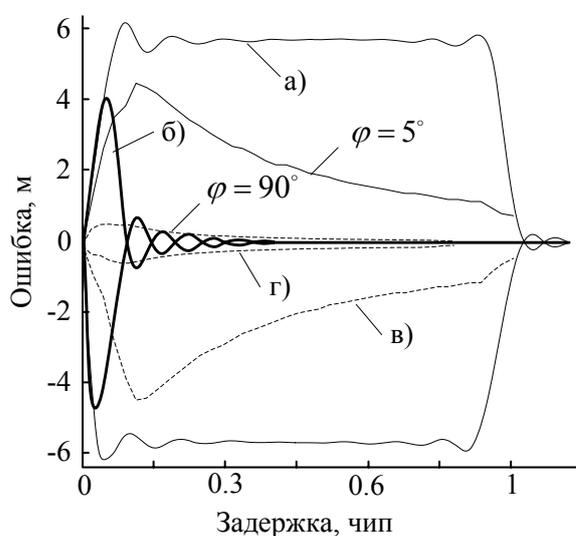


Рис.5 Зависимость ошибки измерения псевдодалности от задержки отраженного сигнала для системы GPS

Было показано, что совместное использование узкого коррелятора и комплексного фильтра дает эффект подобный применению коррелятора со сложной формой строка. На рис.5 ошибке системы с узким коррелятором без комплексной фильтрации соответствует график а), ошибке системы с коррелятором со специальной формой строка – б), графики в) и г) – действию помехи по верхнему и нижнему лучам в системе с узким коррелятором и комплексным кодо-фазовым фильтром с постоянной времени 100 с.

При совместном использовании коррелятора со сложной формой строка и комплексного фильтра заметное улучшение достигается только при малых углах места спутника и в среднем выигрыш по сравнению с узким коррелятором невелик.

Оценка влияния скорости вращения Земли на уровень ошибок МЛР показала, что ошибки МЛР возрастают в среднем на 10-20%. Влияние скорости вращения Земли на уровень ошибок МЛР в системе ГЛОНАСС меньше, чем в GPS, так как в системе ГЛОНАСС используются орбиты с большим наклоном.

Показано, что смещение приемника  $\Pi$  относительно плоскости орбиты спутника на угол  $\theta_{\text{см}}$  приводит к тому, что положение оси доплеровской частоты  $f_{\text{д}}$  от отраженных сигналов не совпадает с направлением на спутник. На рис.6а показан случай отсутствия смещения  $\theta_{\text{см}} = 0^\circ$ , ось  $f_{\text{д}}$  совпадает с направлением на спутник. При  $\theta_{\text{см}} \neq 0^\circ$  (рис.6б), по мере уменьшения угла места  $\varphi$  до  $5^\circ$ , угол поворота оси доплеровской частоты  $\gamma$  достигает значений  $60^\circ \div 70^\circ$ . При этом положение оси  $f_{\text{д}}$  не совпадает с направлением на спутник. На рисунке  $\psi$  – угол азимута спутника  $C$ .

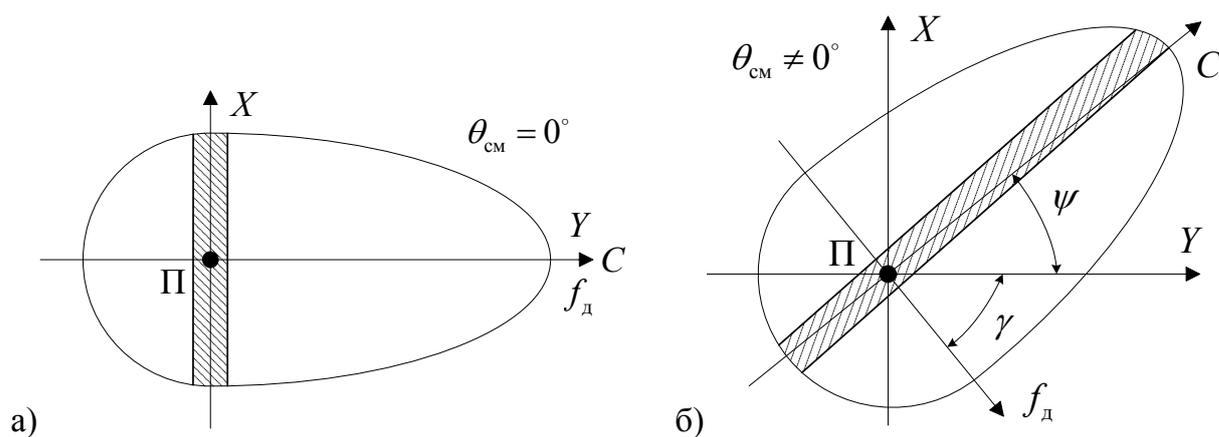


Рис.6 Зависимость положения области помех МЛР от  $\theta_{\text{см}}$

Таким образом, область, создающая существенные ошибки МЛР, разворачивается и удлиняется, при этом в нее попадают объекты, создающие опасные низкочастотные ошибки МЛР, которые не ослабляются комплексным фильтром.

Расчет диффузионной составляющей ошибки МЛР для систем GPS и ГЛОНАСС показал, что использование кодо-фазового фильтра с постоянной времени 100 с приводит к ослаблению диффузионной составляющей ошибки МЛР и при угле места спутника  $\varphi = 90^\circ$  составляет  $23 \div 25$  дБ. При снижении угла места степень подавления диффузионной составляющей снижается до  $12 \div 13$  дБ. При этом в системе ГЛОНАСС комплексный фильтр обеспечивает снижение диффузионной составляющей на  $1 \div 1.2$  дБ больше, чем в GPS из-за более высокой скорости движения спутников.

**В четвертой главе** проведено усовершенствование известного метода прогнозирования чересуточной повторяемости ошибки МЛР на ЛККС для системы ГЛОНАСС. Так как период обращения спутников в ГЛОНАСС не совпадает с длительностью солнечных суток, для расчета момента наблюдения повторной конфигурации созвездия

спутников использовался сдвиг спутников на  $1/8$  периода в одной орбитальной плоскости  $11.26 \text{ ч.} * (2 + 1/8) = 23 \text{ ч.} 56 \text{ мин.}$

Результаты экспериментального исследования чересуточной повторяемости ошибки МЛР на ЛККС подтверждают возможность построения диаграммы объемного распределения прогнозируемой дисперсии наземной ошибки МЛР и определения прогнозируемой дисперсии наземной ошибки МЛР для каждого спутника в соответствии с его угловыми координатами. Показано, что в системе ГЛОНАСС точность оценки прогнозируемой дисперсии наземной ошибки МЛР оказывается ниже, что связано с меньшей точностью совпадения орбит спутников.

Известные методы не применимы для оценки ошибок МЛР на борту ВС из-за быстрого изменения угловой ориентации спутников при маневрировании ВС. Для бортовой аппаратуры ВС был предложен метод расчета помех МЛР с использованием эфемеридных данных. При этом для оценки помех МЛР используется существующая программа эфемеридного расчета. Так как эфемеридные данные вычисляются непрерывно, можно оценивать влияние помех МЛР в реальном времени в бортовой аппаратуре ВС с незначительными программными затратами. Если производные доплеровской частоты  $f_d$  по координатам  $x$  и  $y$  обозначить, как  $\partial f_d / \partial x$  и  $\partial f_d / \partial y$ , модуль вектора скорости изменения доплеровской частоты  $|\dot{f}_d|$  и его направление  $\gamma$  можно представить в виде:

$$|\dot{f}_d| = \sqrt{\left(\frac{\partial f_d}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_d}{\partial y}\right)^2}, \quad \gamma = \arctg\left(\frac{\partial f_d}{\partial x} / \frac{\partial f_d}{\partial y}\right).$$

На примере систем GPS и ГЛОНАСС показано, что при прогнозировании дисперсии ошибок МЛР при комплексной кодо-фазовой фильтрации существенным оказывается влияние направления оси изменения доплеровской частоты и положение области опасных низкочастотных ошибок МЛР.

На рис.7 показан пример расчета зависимости от времени скорости изменения доплеровской частоты  $\dot{f}_d$  спутника системы ГЛОНАСС №1 02-04-2009, выполненный по принятым эфемеридным данным. На этом же рисунке показан график угла места  $\varphi$ , полученный из приемника.

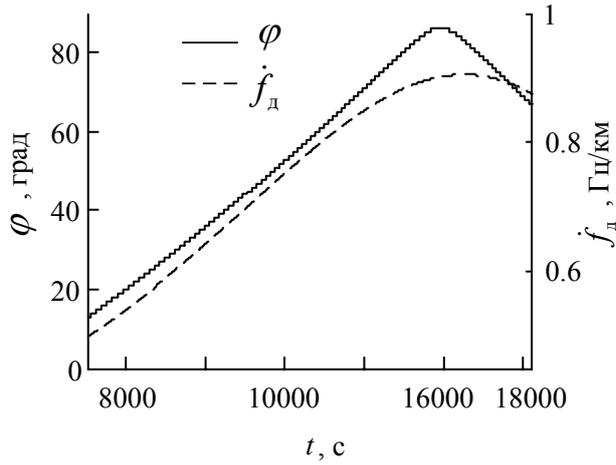


Рис.7 Зависимость скорости изменения доплеровской частоты и угла места для спутника ГЛОНАСС от времени

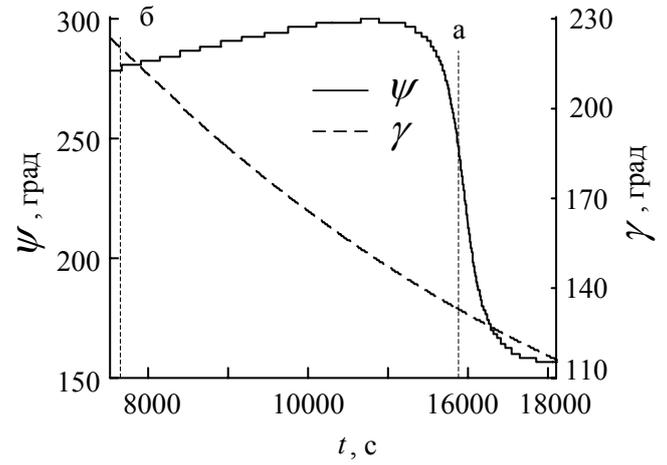


Рис.8 Зависимость направления оси изменения доплеровской частоты для спутника ГЛОНАСС от времени

Для этого примера вычислена зависимость от времени направления оси изменения доплеровской частоты  $\gamma$  (рис.8). Там же приведена зависимость угла азимута спутника  $\psi$ , выработанного приемником.

В момент времени  $t_a$  угол  $\gamma = 132^\circ$  (рис.9а) и помехи МЛР от стабилизатора ВС ослабляются. В момент времени  $t_b$  угол сдвига  $\gamma = 220^\circ$  (рис.9б) при этом частота отражения от стабилизатора окажется в полосе пропускания кодо-фазового фильтра, и ослабления помехи МЛР не происходит.

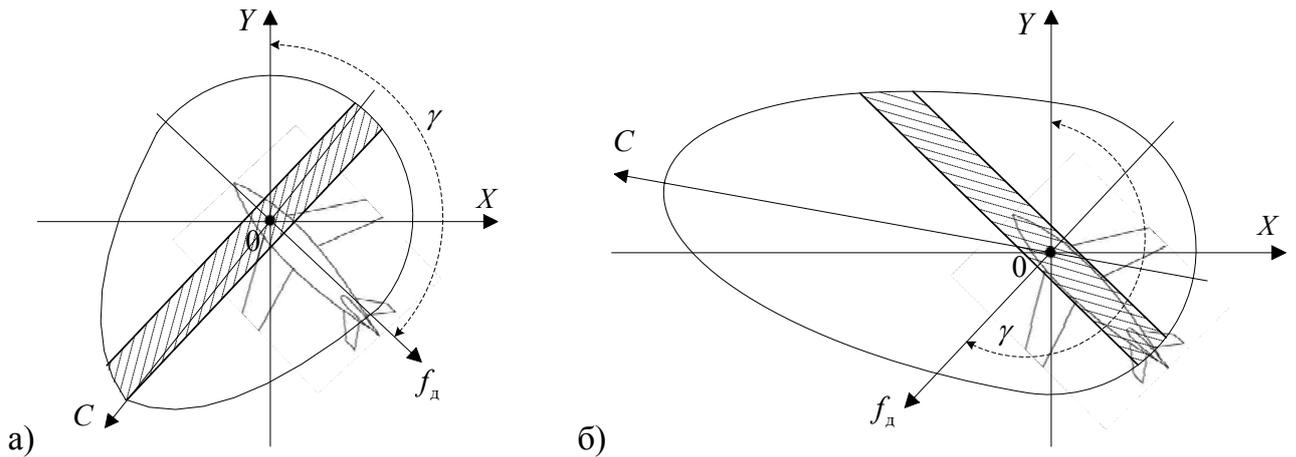


Рис.9 Влияние направления оси изменения доплеровской частоты для спутника ГЛОНАСС №1 02-04-2009

Расчеты для кодо-фазового фильтра с постоянной времени 100 с показали, что при расстоянии между приемной антенной и стабилизатором ВС, равным 25 м, дисперсия ошибки МЛР изменяется в пределах от 0 до -20,4 дБ для GPS и от 0 до -23 дБ для ГЛОНАСС.

Для прогнозирования опасных отражений при комплексной обработке в реальном времени предложено использовать диаграммы бистатической эффективной поверхности рассеяния элементов корпуса ВС и данные об угловом положении спутника относительно координатной системы, привязанной к корпусу ВС.

**В пятой главе** представлены результаты экспериментального исследования спектров ошибок МЛР в каналах стандартной и высокой точности и сравнение спектров ошибок МЛР в ССЗК с узким коррелятором и коррелятором со сложной формой строга при использовании комплексной фильтрации в системе GPS и ГЛОНАСС.

Подтверждено экспериментально, что без использования комплексного фильтра в системах ГЛОНАСС и GPS ширина спектров ошибок МЛР в канале ВТ меньше, чем в канале СТ, так как более коротким элементарным символам кода в канале ВТ соответствуют ошибки МЛР с меньшим максимальным доплеровским сдвигом. Использование комплексной фильтрации кодовых измерений псевдодальности приводит к тому, что низкочастотная составляющая спектров ошибки МЛР в каналах СТ и ВТ отличается незначительно (рис.10).

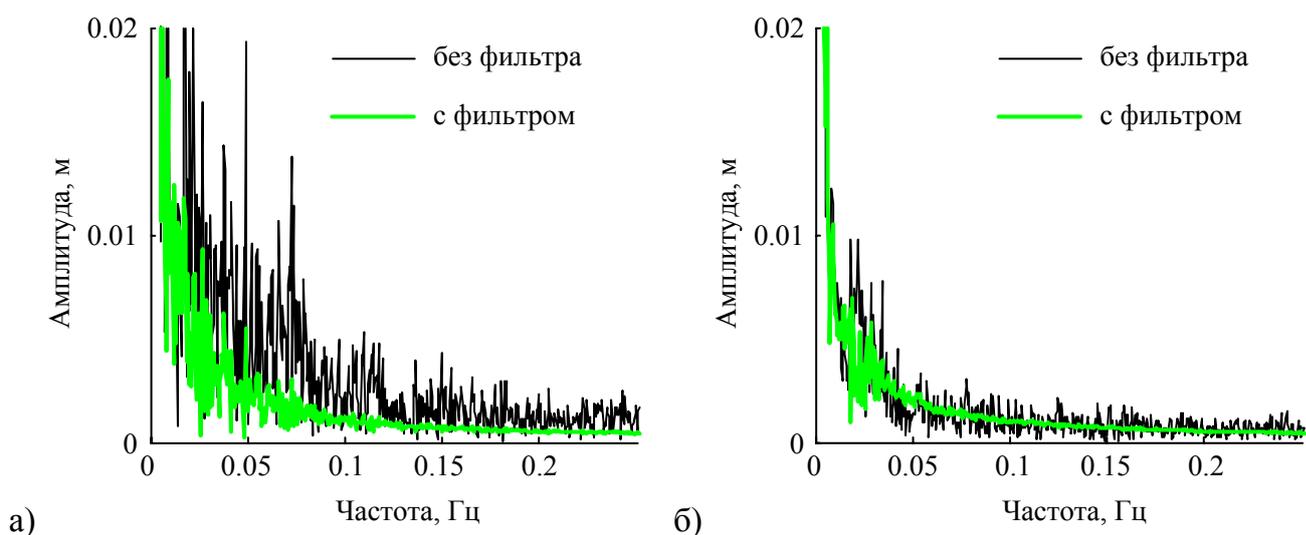


Рис.10 Спектры разности кодовых и фазовых отсчетов псевдодальности для спутника GPS №23 08-04-2009 в каналах СТ (а) и ВТ (б) на частоте L1

Подтверждено экспериментально, что при использовании комплексной фильтрации кодовых измерений псевдодальности различие между системами ГЛОНАСС и GPS становится незначительным, несмотря на то, что ширина элементарного символа кода в канале СТ в системе ГЛОНАСС в два раза больше, чем в GPS. При сравнении траектории спутников подбирались близкими по углу места. Угол места спутника ГЛОНАСС изменялся в диапазоне  $27^\circ \div 87^\circ \div 79^\circ$ , а спутника GPS –  $41^\circ \div 83^\circ \div 73^\circ$ . СКО разности кодовых и фазовых отсчетов псевдодальности без использования комплексной кодо-фазовой фильтрации с постоянной времени 100 с на частоте L1 для спутника ГЛОНАСС составила 0.89 м, для спутника GPS – 0.46 м. При использовании комплексной фильтрации СКО разности кодовых и фазовых отсчетов псевдодальности на частоте L1 в канале СТ для спутника ГЛОНАСС составила 0.28 м, для спутника GPS в канале СТ – 0.26 м.

Подтверждено экспериментально, что применение коррелятора со специальной формой строба вместе со снижением ошибок МЛР приводит к возрастанию широкополосной составляющей шумовой ошибки (рис.11а). В приемнике фирмы Javad режим работы ССЗК с узким коррелятором обозначается "normal", а с коррелятором со специальной формой строба – "mpnew".

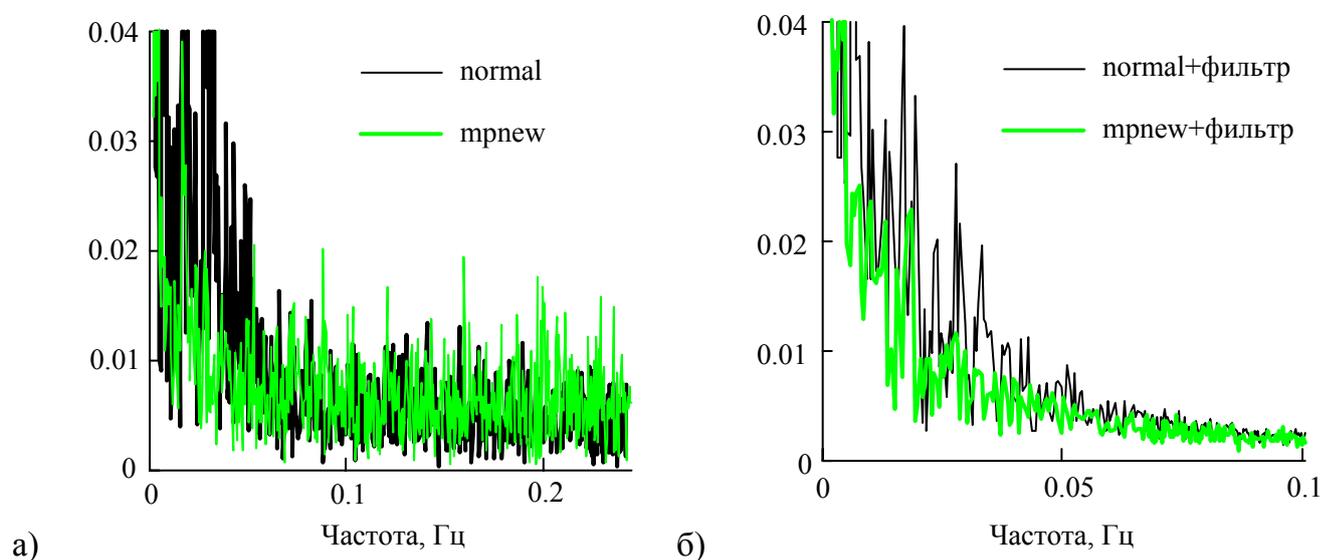


Рис.11 Спектры разности кодовых и фазовых отсчетов псевдодальности для спутника GPS №8 13-05-2009 в канале СТ на частоте L1

Если отсчеты псевдодальности подвергаются комплексной кодо-фазовой фильтрации, то различие спектров для режимов работы с узким коррелятором и коррелятором со специальной формой строба становится незначительным (рис.11б).

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Предложен метод оценки ошибок МЛР специальным измерителем на основе двухканального измерителя ОСШ с узкими стробами, который позволяет измерять ошибки МЛР при низком или нулевом сдвиге доплеровской частоты ошибки МЛР, при котором нельзя использовать методы измерения ошибок МЛР полосовым фильтром и корреляционным методом.
2. Установлена связь сдвига доплеровской частоты отраженного сигнала и его задержки при различном положении приемника потребителя относительно плоскости орбиты спутника.
3. Показано и подтверждено экспериментально, что при комплексной фильтрации измерений псевдодальности в аппаратуре потребителя спутниковой системы совместное использование узкого коррелятора и комплексного фильтра дает эффект подобный применению коррелятора со сложной формой строба.
4. Показано, что ширина спектра ошибок МЛР зависит от длительности элементарного символа кода. Подтверждено экспериментально, что при комплексной фильтрации измерений псевдодальности в аппаратуре потребителя спутниковой системы спектр ошибок МЛР в области низких частот в каналах СТ в системах ГЛОНАСС и GPS отличается незначительно, несмотря на то, что ширина элементарного символа кода в системе ГЛОНАСС в два раза больше, чем в GPS. На основе экспериментальных данных для выбранных спутников ГЛОНАСС и GPS с близкими траекториями показано, что среднеквадратическое отклонение разности кодовых и фазовых отсчетов псевдодальности на частоте L1 для спутника ГЛОНАСС в канале СТ составило 0.28 м, а для спутника GPS – 0.26 м.
5. Предложен метод расчета помех МЛР при комплексной обработке с использованием эфемеридных данных. При этом для оценки помех МЛР используется существующая программная часть навигационного приемника. На примере систем GPS и ГЛОНАСС показано, что при прогнозировании дисперсии ошибок МЛР при комплексной обработке существенным оказывается учет направления оси изменения доплеровской частоты и положение области опасных низкочастотных ошибок МЛР. Расчеты для кодо-фазового фильтра с постоянной времени 100 с показали, что при расстоянии между приемной антенной и стабилизатором ВС, равным 25 м, дисперсия ошибки, создаваемой отражением от стабилизатора, при движении спутника изменяется в пределах от 0 до -20,4 дБ для GPS и от 0 до -23 дБ для ГЛОНАСС.

**ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Шарыпов, А.А. Исследование эффективности коррекции скачков фазовых измерений при формировании дифференциальных поправок в глобальной навигационной системе [Текст] / Юрченко Ю.С., Чистякова С.С., Шарыпов А.А. // Известия Государственного электротехнического университета. / СПбГЭТУ "ЛЭТИ", – 2006. – Вып. 2: Радиоэлектроника и телекоммуникации. – С.32-36.
2. Шарыпов, А.А. Исследование точности измерения ошибок от действия переотражений в аппаратуре потребителя глобальной навигационной спутниковой системы [Текст] / Юрченко Ю.С., Шарыпов А.А. // Известия высших учебных заведений России. / СПбГЭТУ "ЛЭТИ", – 2009. – Вып. 3: Радиоэлектроника. – С.56-60.

Другие работы:

3. Шарыпов, А.А. Формирование дифференциальных поправок псевдодальноносей с коррекцией фазовых измерений [Текст] / Соколов А.И., Чистякова С.С., Шарыпов, А.А. // 61-я Научно-техническая конференция посвященная Дню радио, СПбГЭТУ "ЛЭТИ", – 2006. СПб., апр. 2006 г. – С.21-23.
4. Шарыпов, А.А. Исследование методов оценки ошибок от переотражений при формировании поправок в базовой станции дифференциальной спутниковой системы [Текст] / 62-я Научно-техническая конференция посвященная Дню радио, СПбГЭТУ "ЛЭТИ", – 2007. СПб., апр. 2007 г. – С.34-35.
5. Шарыпов, А.А. Оценка точности измерения переотражений в аппаратуре потребителя глобальной навигационной спутниковой системы [Текст] / 63-я Научно-техническая конференция посвященная Дню радио, СПбГЭТУ "ЛЭТИ", – 2008. СПб., апр. 2008 г. – С.48-50.
6. Шарыпов, А.А. Исследование методов оценивания ошибок от действия переотражений в глобальной навигационной спутниковой системе [Текст] / 64-я Научно-техническая конференция посвященная Дню радио, СПбГЭТУ "ЛЭТИ", – 2009. СПб., апр. 2009 г. – С.28.
7. Шарыпов, А.А. Исследование влияния фильтрации на ошибки многолучевого распространения в глобальной навигационной спутниковой системе [Текст] / 65-я Научно-техническая конференция посвященная Дню радио, СПбГЭТУ "ЛЭТИ", – 2010. СПб., апр. 2010 г. – С.38-39.