

На правах рукописи

РГБ ОД

20 ноя 2000

*Сушкин Игорь Николаевич*

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И РАЗРАБОТКА АППАРАТУРЫ  
ДЛЯ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

Красноярск – 2000г

Работа выполнена в Красноярском государственном техническом университете.

- Научные руководители: – доктор технических наук,  
профессор ЧМЫХ М.К.  
кандидат технических наук,  
с.н.с. Кокорин В.И.
- Официальные оппоненты: – доктор технических наук, профессор  
Панько С.П.,  
кандидат технических наук  
Толстиков А.С.
- Ведущая организация – Научно–производственное объединение прикладной механики г. Железнодорожск

Защита состоится "27" июня 2000г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 064.54.03 при Красноярском государственном техническом университете по адресу: 660074, Красноярск, ул. Борисова, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Красноярского государственного технического университета.

Автореферат разослан "23" июня 2000г.

Ученый секретарь специализированного совета



Ю.П. Саломатов

895-5-044,0

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Решение большого числа научно-технических задач связано с сопоставлением во времени событий, происходящих в пространственно-разнесенных точках, т.е. с необходимостью обеспечения синхронного хода часов в этих точках, а также синхронизации генераторов, работающих в общей сети.

В настоящее время получил широкое распространение многостанционный доступ с временным разделением, особенно с ростом числа пользователей мобильной связи. При этом приемо-передающие станции должны работать в синхронном режиме.

В системах передачи данных по оптоволоконным линиям в ретрансляционных станциях используются рубидиевые генераторы, требующие периодической подстройки значения частоты.

В настоящее время существующие системы частотно-временной синхронизации либо ограничены по зоне действия либо имеют высокую стоимость. В связи с этим важной и актуальной является задача разработки аппаратуры и высокоточных алгоритмов, позволяющих производить временную и частотную синхронизацию объектов. По точности, зоне действия, стоимости приемной аппаратуры наиболее перспективными для решения этих задач, являются навигационные космические системы.

В последние годы развиваются глобальные спутниковые радионавигационные системы (СРНС) 2-го поколения ГЛОНАСС и GPS. При разработке и начальном использовании этих систем полагалось, что с их помощью будут решаться задачи определения координат и скорости подвижных объектов в любой точке планеты и воздушном пространстве. Наряду с определением координат и составляющих вектора скорости, использование сигналов навигационных космических аппаратов (КА) позволяет обеспечить частотно-временную синхронизацию объектов.

При разработке методов, алгоритмов и создании фазовой аппаратуры частотно-временной синхронизации использовались труды М.К. Чмыха, В.С. Шебшеевича, Н.С. Жилина, В.А. Майстренко и других ученых.

**Цель работы.** Целью диссертации является разработка и исследование методов частотной синхронизации генераторов, функционирующих в единой сети и формирования высокостабильной метки времени на основе сигналов спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS.

**Задачи исследования:**

1. Разработка метода и алгоритма формирования метки времени в одночастотном фазовом приемнике сигналов систем ГЛОНАСС и GPS для неподвижного объекта.
2. Разработка метода и алгоритма формирования метки времени и повышения точности определения параметров движения объекта, перемещающегося по заранее известной траектории.
3. Разработка методов и алгоритмов синхронизации опорного генератора в фазовом приемнике, работающем по сигналам спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS.
4. Разработка алгоритма уменьшения погрешности синхронизации опорного генератора на основе приемника сигналов систем ГЛОНАСС и GPS.

**Научная новизна.**

1. Разработан алгоритм уменьшения погрешности формирования метки времени объекта, движущегося по известной траектории с применением цифровой базы данных.
2. Разработан метод синхронизации опорного генератора с погрешностью  $10^{-12}$  в одночастотном приемнике, работающем по сигналам спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS и измеряющего доплеровское смещение частоты принимаемых сигналов, для минимального и избыточного созвездия КА.
3. Разработан метод синхронизации генератора в одночастотном приемнике сигналов ГЛОНАСС и GPS с погрешностью  $10^{-12}$  и увеличением быстродействия за счет измерения фазового сдвига сигналов и применения регрессионного анализа.

4. Разработан метод уменьшения погрешности синхронизации опорного генератора в одночастотном фазовом приемнике, работающем по сигналам спутниковых систем, путем учета скорости изменения задержки распространения сигнала в ионосферном и тропосферном слоях.

#### **Практическая ценность.**

Разработанные алгоритмы позволяют уменьшить погрешность частотно-временной синхронизации. Полученные алгоритмы реализованы в программном обеспечении на языке Ассемблер. Разработанные структурные схемы внедрены в аппаратуре МРК-23 и МРК-19 и освоена в серийном производстве.

#### **Методы исследования.**

В диссертационной работе использованы методы математического анализа, линейной алгебры, статистические методы оценки параметров сигнала, методы математического моделирования, экспериментальные испытания.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Использование априорных данных о местоположении объекта и учет параметров ионосферы и тропосферы позволяет получить оценку задержки сигнала обусловленной трассой распространения, при работе по избыточному созвездию и обеспечивает синхронизацию с погрешностью 200 нсек. в одночастотном фазовом приемнике сигналов ГЛОНАСС и GPS.
2. Селекция спутников по углу возвышения при измерение доплеровского смещения частоты в приемнике сигналов систем ГЛОНАСС и GPS, позволяет синхронизировать опорный генератор с погрешностью  $10^{-12}$ .
3. Измерение фазовых сдвигов принимаемых сигналов и применение регрессионного анализа измеренных радионавигационных параметров, позволяет уменьшить время синхронизации опорного генератора, в одночастотном фазовом приемнике сигналов ГЛОНАСС и GPS, относительно доплеровского метода.
4. Учет скорости изменения задержки распространения сигнала в ионосферном и тропосферном слоях, позволяет увеличить число используемых спутников для уменьшения случайной составляющей погрешности синхронизации опорного генератора.

5. Учет априорной информации о траектории движения объекта в аппаратуре, работающей по сигналам спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS, позволяет уменьшить погрешность временной синхронизации подвижного объекта.

**Достоверность результатов.** Подтверждается моделированием и натурными испытаниями на образцах аппаратуры МРК-23 и МРК-19Л.

**Реализация и внедрение.** На основе результатов, полученных в процессе выполнения диссертационной работы, разработаны, испытаны и внедрены в серийное производство образцы фазовых навигационных приемников, работающих по сигналам систем ГЛОНАСС/GPS: МРК-19Л, МРК-23. Результаты исследований использованы в следующих НИР и ОКР, выполненных в Красноярском государственном техническом университете и ГНПП «Радиосвязь»: «Исследование возможности использования навигационной аппаратуры потребителя глобальных навигационных систем в подвижных станциях связи». «Разработка навигационно-информационного комплекса автоматизированной системы управления движением поездов «Магистраль». Разработана и внедрена в серийное производство аппаратура частотно-временной синхронизации МРК-23С.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий XXI века» г. Красноярске (1994 г.); на международной конференции «Планирование глобальной радионавигации» г. Москва (1995 г.); на международной конференции «Proceedings of ICSC-96» г. Москва (1996 г.); на научно-технической конференции с международным участием «Спутниковые системы связи и навигации» Красноярске (1997 г.); на IV международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация и связь» г. Воронеж (1998г.), на V международно научно-технической конференции «Радиолокация, навигация и связь» г. Воронеж (1999 г.); региональная научно-техническая конференция «ТрансСиб-99» Новосибирске (1999); of 7<sup>th</sup> Saint Petersburg international conference on integrated navigation systems. Saint Petersburg (2000 г.).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 21 печатной работе, защищены патентом РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и 2-х приложений. Общий объем работы составляет 121 страницу, из них 102 страницы основного текста, включая 32 рисунка, список литературы из 59 наименований на 9 страницах.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проводимых исследований, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна и практическая реализация, представлены структура диссертации и основные положения, выносимые на защиту. Рассмотрены преимущества и недостатки основных радиотехнических методов частотно-временной синхронизации объектов.

**В первой главе** рассмотрены алгоритмы формирования метки времени в одночастотном фазовом специализированном приемнике сигналов радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS с учетом априорных данных и оценки задержки распространения сигнала в ионосферном и тропосферном слоях, алгоритм решения поставленной задачи по избыточной группировке космических аппаратов, алгоритм учета априорных данных для формирования метки времени, метод уменьшения систематической составляющей погрешности в одночастотной фазовой аппаратуре путем оценки задержки распространения сигнала в ионосферном и тропосферном слоях.

Исходная система уравнений для определения расхождения часов приемника от опорной системной шкалы имеет вид:

$$\Delta t = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^n \left( R_i - \sqrt{(x_{ci} - x)^2 + (y_{ci} - y)^2 + (z_{ci} - z)^2} \right), \quad (1)$$

где:  $x_{ci}, y_{ci}, z_{ci}$  – координаты  $i$ -го НКА;  $R_i$  – измеренная псевдодальность от объекта до  $i$ -го КА;  $x, y, z$  – координаты потребителя;  $c$  – скорость света;  $\Delta t$  – расхождения часов потребителя и системы ГЛОНАСС;  $n$  – число КА по которым ведется измерение радионавигационных параметров.

Для временной синхронизации возможно совместное использование двух навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. В качестве опорной шкалы времени для GPS принята UTC(USNO), формируемая в Морской обсерватории США. Учитывая поправки, возможна синхронизация как к ГЭВЧ, так и UTC(USNO).

При формировании метки времени при помощи глобальных спутниковых систем возникают систематические погрешности, обусловленные задержкой радиосигналов при распространении в ионосферном и тропосферном слоях.

В настоящее время известны две модели распределения электронной концентрации: экспоненциальная и биэкспоненциальная, которые описывают наиболее характерные особенности строения ионосферы. Наиболее часто используются биэкспоненциальная модель. Поправка к групповому пути для биэкспоненциальной модели профиля электронной концентрации при произвольном угле места

$$S = \frac{4,03 \cdot 10^7}{f^2} \gamma N_m \frac{1}{\sin \alpha} \sum_1^2 (-1)^{i+1} h_i \left[ 1 - \exp\left(-\frac{z_i - h_0}{h_i}\right) \right], \quad (2)$$

где:  $h_0=200$  км, высота начального ионосферного слоя;  $h_1=325$  км и  $h_2=32,5$  км, нижняя и верхняя границы ионосферного слоя;  $\alpha$  – угол места потребителя относительно источника излучения сигнала;  $z_i = \sqrt{R_c^2 + 2R_c R \sin \alpha + R^2} - R_c$ , высота источника излучения;  $R_c$  – радиус Земли;  $R$  – расстояние от источника до приемника излучения;  $\gamma = 1,435$  и характеризует максимум биэкспоненциальной модели.

Величина  $N_m$  зависит от состояния ионосферы, которое изменяется в течении суток и может использоваться как дополнительное слагаемое в уравнении (1).

$$\overline{R}_i = \sqrt{(x_{ci} - x)^2 + (y_{ci} - y)^2 + (z_{ci} - z)^2} + c\Delta t + \frac{5,783 \cdot 10^7}{f_i^2 \sin \alpha_i} N_m. \quad (3)$$

Ввод дополнительного неизвестного позволяет производить оценку состояния ионосферы и поправку к времени распространения сигнала от объекта до КА.



Аналогично оценивается влияние тропосферы на распространение излучаемого сигнала с КА. В диапазоне радиочастот индекс преломления зависит от параметров тропосферы

$$v_0 = 77,6P/T + 3,73 \cdot 10^5 e/T^2, \quad (4)$$

где:  $P$  – атмосферное давление в миллибарах;  $T$  – температура в Кельвинах;  $e$  – давление водяного пара в миллибарах. Это соотношение дает ошибку менее 0,5% для частот до 100 ГГц. При расчете радиофизических характеристик распространяющегося в тропосфере сигнала будем использовать экспоненциальную модель высотного профиля преломления, так что

$$v = v_0 e^{-b h}, \quad (5)$$

где  $v_0$  – значение индекса преломления над уровнем моря;  $b=136 \text{ м}^{-1}$ ;  $h \approx 8 \text{ км}$ .

Оценивая  $v_0$  можно рассчитать интегральный показатель коэффициента преломления и поправку к задержке распространения для стандартной тропосферы

$$S = \left( \frac{4 \cdot 10^3 v}{\sin \alpha} \right) (1 - \exp\{-z_n/h\}). \quad (6)$$

Окончательное выражение для вычисления отклонения часов потребителя от системы имеет вид

$$\Delta t = \frac{\bar{R}_i - \sqrt{(x_{ci} - x)^2 + (y_{ci} - y)^2 + (z_{ci} - z)^2} - \frac{5,783 \cdot 10^7}{f_i^2 \sin \alpha_i} N_m - \frac{4 \cdot 10^3 v (1 - \exp\{z_n/h\})}{\sin \alpha_i}}{c} \quad (7)$$

Для решения уравнения (7) составлена система

$$\begin{cases} \Delta t = \Delta \tau_1 - X_1 N_m \\ \Delta t = \Delta \tau_2 - X_2 N_m \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{где: } \Delta \tau_i = \frac{R_i - \sqrt{(x_{ci} - x)^2 + (y_{ci} - y)^2 + (z_{ci} - z)^2} - \frac{4 \cdot 10^3 v (1 - \exp\{z_n/h\})}{\sin \alpha_i}}{c};$$

$X_i = \frac{5,783 \cdot 10^7}{f_1^2 \sin \alpha_i}$ . Окончательные выражения имеют вид:

$$\Delta t = \frac{\Delta \tau_2 - \frac{X_2}{X_1} \Delta \tau_1}{1 - \frac{X_2}{X_1}} \quad \text{и} \quad N_m = \frac{\Delta \tau_1}{X_1} - \frac{\Delta \tau_2 - \frac{X_2}{X_1} \Delta \tau_1}{1 - \frac{X_2}{X_1}} \quad (9)$$

Для реализации данного алгоритма, с учетом особенностей построения одночастотного, фазового приемника, работающего по сигналам систем ГЛОНАСС и GPS, была разработана структурная схема.

Во второй главе разработан метод синхронизации генератора с погрешностью  $10^{-12}$  в одночастотном фазовом приемнике сигналов систем ГЛОНАСС и GPS по измерению доплеровского смещения частоты. Разработан метод синхронизации генератора в одночастотном фазовом приемнике сигналов ГЛОНАСС и GPS, основанный на измерении приращения фазовых сдвигов принимаемых сигналов КА, с погрешностью  $10^{-12}$  и увеличением быстродействия. Разработан метод уменьшения погрешности определения частоты опорного генератора, в одночастотном, фазовом приемнике ГЛОНАСС и GPS, реализованный путем учета скорости изменения задержки распространяемого сигнала в ионосферном и тропосферном слоях.

Исходным уравнением для определения отклонения частоты опорного генератора является

$$\Delta F = \frac{1}{\text{сп}} \left( \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta x_i \frac{\partial x_{ki}}{\partial t} + \Delta y_i \frac{\partial y_{ki}}{\partial t} + \Delta z_i \frac{\partial z_{ki}}{\partial t}}{R_i} \right) - \sum_{i=1}^n \frac{(1 + \gamma_i) F_{d,i} c}{F_{d,i}} \right), \quad (10)$$

где:  $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$  – разность между соответствующими координатами  $i$ -го КА и потребителя;  $\frac{\partial x_{ki}}{\partial t}, \frac{\partial y_{ki}}{\partial t}, \frac{\partial z_{ki}}{\partial t}$  – составляющие вектора скорости  $i$ -го

НИСЗ;  $\frac{\partial x}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial y}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial z}{\partial t}$  – составляющие вектора скорости потребителя;

$$\gamma_i = \frac{F_{л,i} - f_H}{f_H} \text{ и передается с космического аппарата.}$$

Влияние ионосферной составляющей в процессе движения КА обусловлено прохождением радиосигнал под разными углами к потребителю. Период обращения КА составляет примерно 12 часов, соответственно угловая скорость равна

$$\omega_c = \frac{2\pi}{12 \cdot 60} = 0,5 \text{ град/мин.} \quad (11)$$

Скорость изменения задержки распространения в ионосферном слое

$$\Delta v = \frac{S_{i-1} - S_i}{\Delta t}. \quad (12)$$

Погрешность синхронизации опорного генератора обусловлена изменением задержки распространения сигнала в ионосферном слое, которую можно оценить по формуле:

$$\frac{\Delta f}{F} = \frac{\Delta v}{c}. \quad (13)$$

Результаты расчета приведены на рис. 1.

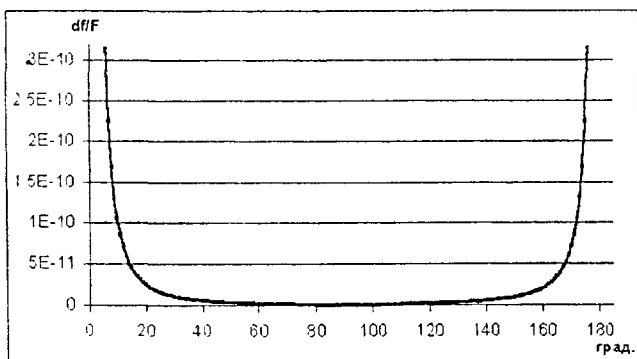


Рис. 1.

Для обеспечения погрешности синхронизации генератора менее  $10^{-12}$  необходимо выбирать спутники с углом возвышения более 30 градусов.

Аналогично моделированию ионосферной составляющей погрешности рассмотрим тропосферную составляющую. Результат моделирования погрешности синхронизации опорного генератора, обусловленная задержкой распространения радиосигнала в тропосферном слое представлен на рис. 2.

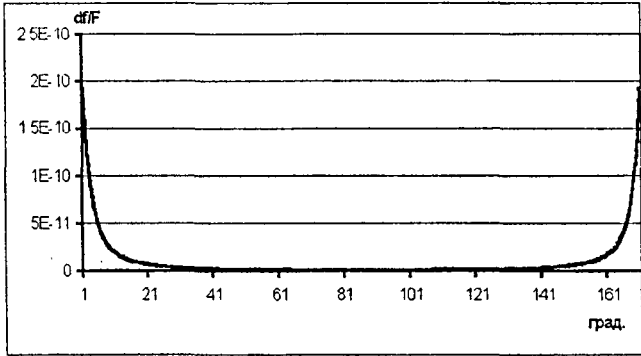


Рис.2.

Для увеличения точности синхронизации, за счет уменьшения тропосферной составляющей, до  $10^{-12}$  необходимо использовать спутники с углом возвышения более 23 градусов.

По описанному выше алгоритму определяется концентрация ионов в ионосферном слое и оценивается скорость изменения задержки распространения в ионосферном слое. Аналогично оценивается скорость изменения задержки в тропосферном слое. Окончательное выражение для определения частоты опорного генератора с учетом изменения времени распространения в ионосферном и тропосферном слоях имеет вид:

$$\Delta F = \frac{1}{c\pi} \left( \sum_{i=1}^n \frac{\left( \Delta x_i \frac{\partial x_{ci}}{\partial a} + \Delta y_i \frac{\partial y_{ci}}{\partial a} + \Delta z_i \frac{\partial z_{ci}}{\partial a} \right)}{R_i} - \sum_{i=1}^n \frac{(1+\gamma_i) F_{d,i} c}{F_{\text{л},i}} - \sum_{i=1}^n \Delta \omega_i - \sum_{i=1}^n \Delta \omega_{i,\text{троп}} \right). \quad (14)$$

Получен алгоритм определения частоты опорного генератора методом накопления временного сдвига. Функция изменения частоты опорного генератора  $y = f(x)$  задана экспериментальными значениями

$$y_i = f(x_i) + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, N, \quad (15)$$

где  $\varepsilon_i$  – некоррелированные случайные величины, имеющие нулевое математическое ожидание и дисперсию  $\sigma^2$ . При аппроксимации функции  $y = f(x)$  алгебраическим полиномом и решении системы методом наименьших квадратов, по результатам измерений радионавигационных параметров необходимо оценить коэффициенты  $a_i$  полинома таким образом, чтобы сумма квадратов была минимальной. Оценивание коэффициентов общей линейной модели сводится к решению системы нормальных уравнений

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n a + bx_i = \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i(a + bx_i) = \sum_{i=1}^n y_i x_i \end{cases} \quad (16)$$

Корни системы уравнений имеют вид

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \sum_{i=1}^n y_i x_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}, \quad (17)$$

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n y_i x_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}. \quad (18)$$

Полученное значение **a** характеризует систематическое отклонение частоты генератора от номинального значения, **b** характеризует скорость ухода частоты от номинального значения.

Измеряемым параметром в данном случае является фаза несущей частоты радиосигнала. При работе по  $n$  спутникам отклонение часов определяется выражением:

$$\Delta t_j = \frac{1}{2\pi n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\varphi_{i,j} - \varphi_{i,0} - \Delta\varphi_{i,j}}{f_i} \right), \quad (19)$$

где:  $\varphi_i$  – текущее значение фазы  $i$ -го КА;  $\varphi_{i,0}$  – начальное значение фазы  $i$ -го КА в момент синхронизации приемника;  $\Delta\varphi_i$  – приращение фазы сигнала, обу-

словленное изменением дальности от объекта до КА;  $\Delta\varphi_{i,t}$  – приращение фазы сигнала, обусловленное смещением часов приемника. Приняв  $x = j\Delta t$ , где  $\Delta t$  – шаг интегрирования. Выражения для вычисления отклонения частоты опорного генератора

$$a = \frac{\sum_{j=1}^m \Delta t_j \sum_{j=1}^m (j\Delta t)^2 - \sum_{j=1}^m \Delta t_j j\Delta t \sum_{j=1}^m j\Delta t}{m \sum_{j=1}^m (j\Delta t)^2 - \left( \sum_{j=1}^m j\Delta t \right)^2}, \quad (20)$$

$$b = \frac{m \sum_{j=1}^m \Delta t_j j\Delta t - \sum_{j=1}^m j\Delta t \sum_{j=1}^m \Delta t_j}{m \sum_{m=1}^m (j\Delta t)^2 - \left( \sum_{j=1}^m j\Delta t \right)^2}. \quad (21)$$

где  $m$  – число измерений.

Получено, что при гауссовском законе распределения погрешности с нулевым средним, данный метод уменьшает погрешность в  $\sqrt{3}$ , что позволяет повысить быстродействие специализированного приемника.

В третьей главе разработан метод уменьшения погрешности временной синхронизации с использованием априорных данных. На примере навигационно-информационного комплекса (НИК), разработанного по заказу Красноярской железной дороги, рассмотрен канал передачи данных с временным разделением.

Для обеспечения безопасности движения осуществляется связь между диспетчерским центром и локомотивом. Дискретность составляет не более 3 секунд. Объем передаваемой информации составляет 128 байт, при скорости передачи 9600 кбод, время передачи составляет 0,1 сек. Для обеспечения одновременного сопровождения нескольких составов целесообразно применять временное разделение канала. Навигационно-информационный комплекс формирует данные для передачи, принимает и отображает полученную информацию на дисплее машиниста, а также обеспечивает передачу данных на диспетчерский центр с временным разделением канала.

Для повышения надежности работы НИК и уменьшения погрешности формирования метки времени разработан метод уменьшения погрешности определения местоположения локомотива с учетом априорной информации. В электронной базе данных хранится маршрут, разбитый на элементарные прямые с известными координатами, которые описываются уравнением

$$\begin{cases} y = a_y x + b_y \\ z = a_z x + b_z \end{cases}, \quad (22)$$

где:  $a_y = \frac{k_y}{k_x}$ ;  $b_y = y_1 - a_y x_1$ ;  $a_z = \frac{k_z}{k_x}$ ;  $b_z = z_1 - a_z x_1$ ;  $x_1, y_1, z_1$  – координаты исходной точки;  $x_2, y_2, z_2$  – координаты конечной точки. С учетом (22) навигационное уравнение имеет вид:

$$R_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - a_y x - b_y)^2 + (z_i - a_z x - b_z)^2} + c \Delta t. \quad (23)$$

Дополним уравнение (23) измеренными радионавигационными параметрами с использованием КА. Для решения системы уравнений по двум спутникам методом Ньютона составим градиентную матрицу вида:

$$G = \begin{vmatrix} \frac{\partial \overline{R}_1}{\partial y} & \frac{\partial \overline{R}_1}{\partial c \Delta t} \\ \frac{\partial \overline{R}_2}{\partial y} & \frac{\partial \overline{R}_2}{\partial c \Delta t} \end{vmatrix}. \quad (24)$$

В уравнении (23) два неизвестных  $x$  и  $c \Delta t$ , отсюда можно сделать вывод, что минимальное число НИСЗ, необходимое для определения местоположения объекта, находящегося на известной траектории, равно двум. Уравнение (23) преобразуем к виду:

$$R_i = \sqrt{A_i x^2 + B_i x + C_i} + c \Delta t \quad (25)$$

где:  $A_i = 1 + a_y^2 + a_z^2$ ;  $B_i = 2(a_y b_y - z_i a_z + a_z b_z - y_i a_y)$ ;

$$C_i = (z_i - b_z)^2 + (y_i - b_y)^2 + x_i^2$$

При избыточном наблюдении КА (больше двух) для решения целесообразно применять метод наименьших квадратов. При этом градиентная матрица преобразуется к виду:

$$G = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial R_i}{\partial x} \right)^2 & \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial R_i}{\partial x} \right) \\ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial R_i}{\partial x} \right) & n \end{pmatrix} \quad (26)$$

где:  $n$  – число КА, участвующих в расчете.

При нормальном законе распределения погрешности, точность формирования временной шкалы увеличивается в  $\sqrt{n}$  раз. Уменьшение числа неизвестных уравнения в 2 раза, приводит к уменьшению случайной составляющей погрешности, за счет увеличения избыточности.

Для выполнения описанного алгоритма разработана структурная схема НИК.

В четвертой главе проведены исследования погрешности формирования метки времени. Проведены натурные испытания в Сибирском научно-исследовательском институте метрологии (СНИИМ) на специализированном приемнике МРК-23С с внешней опорной частотой, которая формировалась водородным генератором синхронизированным с ГЭВЧ.

По полученным данным оценивалась точность определения частоты опорного генератора с погрешностью  $10^{-12}$  и время определения. На рис. 3. представлен график определения частоты доплеровским методом.

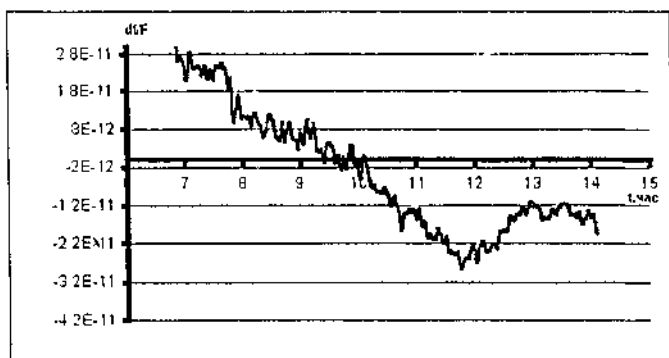


Рис.3.



Результаты эксперимента показали, что для достижения погрешности синхронизации  $10^{-12}$  доплеровским методом необходимо время накопления 16 часов.

На рис.4. представлен график определения частоты основанный на измерении приращения фазовых сдвигов принимаемых сигналов КА, с точностью  $10^{-12}$ .

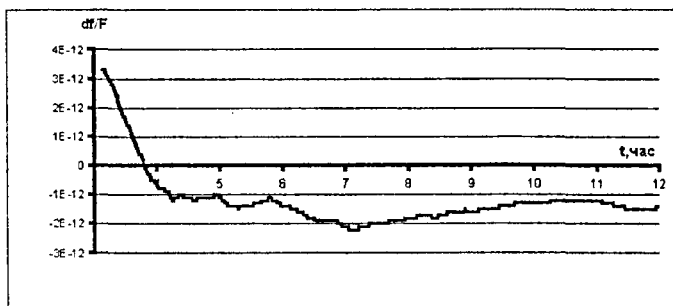


Рис. 4.

Результаты эксперимента показали, что для достижения погрешности синхронизации  $10^{-12}$  с измерением фазового сдвига частоты и применением регрессионного анализа необходимо время накопления 13 часов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод и алгоритм формирования метки времени в приемнике сигналов спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS с высокой точностью для неподвижного объекта. Исследована погрешность формирования метки времени.
2. Разработан метод и алгоритм синхронизации опорного генератора с погрешностью  $10^{-12}$  в одночастотном фазовом приемнике, работающем по сигналам спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Исследованы погрешности синхронизации опорного генератора.
3. Разработан метод синхронизации генератора в одночастотном приемнике сигналов ГЛОНАСС и GPS с погрешностью  $10^{-12}$  и увеличенным быстро-

действия за счет измерения фазового сдвига сигналов и применении регрессионного анализа.

4. Разработана структурная схема приемника формирующего метку времени и осуществляющего синхронизацию опорного генератора.
5. Разработан метод и алгоритм формирования метки времени и повышения точности определения параметров движения объекта, перемещающегося по заранее известной траектории.
6. Результаты экспериментальных исследований подтвердили правильность разработанных алгоритмов.
7. Результаты выполненных исследований использованы при проектировании аппаратуры МРК–23 и МРК–19Л, освоены в серийном производстве на ГУНПП «Радиосвязь».
8. Разработанные методы и алгоритмы уменьшения ионосферной и тропосферной составляющих погрешности могут быть применены при создании навигационной аппаратуры, определяющей вектор состояния и угловую ориентацию объекта.

По теме диссертации опубликованы работы:

1. А.В.Гребенников, В.И.Кокорин, И.Н. Сушкин, М.К.Чмых. Многофункциональная мультиплексная аппаратура, работающая по сигналам СРНС ГЛОНАСС. – В сб.: Проблемы техники и технологий XXI века. – г.Красноярск, 1994, с 70–71.
2. И.Н. Сушкин, М.К.Чмых. Исследование возможности повышения точности измерения координат путем оценки расстройки частоты опорного генератора. В сб.: Проблемы техники и технологий XXI века. – г. Красноярск, 1994, с 72–73.
3. А.В.Гребенников, В.И.Кокорин, И.Н. Сушкин, М.К.Чмых. Измерение нестабильности генераторов с использованием системы ГЛОНАСС. В сб.: Проблемы техники и технологий XXI века. – г. Красноярск, 1994, с 73–75.
4. А.В.Гребенников, В.И.Кокорин, И.Н. Сушкин, М.К.Чмых. Экспериментальное исследование возможности определения координат потребителя при неполной орбитальной группировке КА системы ГЛОНАСС. В сб.: Проблемы техники и технологий XXI века. – г. Красноярск, 1994, с 86–87.
5. А.В.Гребенников, В.И.Кокорин, В.Б.Новиков, И.Н.Сушкин, М.К.Чмых, Ю.Л.Фатеев. Многофункциональный приемоиндикатор радионавигационной системы ГЛОНАСС. В сб.: Современное состояние, проблемы навигации и океанографии. г.Санкт-Петербург 1995, .
6. A.V.Grebennikov, V.I.Kokorin, V.B.Novikov, I.N.Sushkin, M.K.Chmyh, Yu.L.Fateev. Multifunction receiver-indicator for the radionavigation system

- GLONASS. Second International conference on "Development directions of the radio communication systems and means", Voronezh, 1995, pp 192–195.
7. А.В.Гребенников, В.И.Кокорин, В.Б.Новиков, И.Н.Сушкин, М.К.Чмых, Ю.Л.Фатеев. Многофункциональный приемник-индикатор радионавигационной системы ГЛОНАСС. В сборнике трудов международной конференции "Планирование глобальной радионавигации.– г. Москва, 1995.
  8. И.Н.Сушкин. Определение координат потребителя по сигналам системы ГЛОНАСС с учетом априорных данных. В сб.: Цифровые радиотехнические системы и приборы.– г. Красноярск, 1996, с 255–259.
  9. V.N.Avsievich, I.N.Sushkin. Equipment for object three-dimensional orientation determination. Proceedings of ICSC-96, Moscow., Vol III pp 227–230.
  10. I.N. Sushkin, M.K. Chmyh. Results of trails of a receiver-indicator for test GLONASS. Proceedings of ICSC-96, Moscow., Vol III pp 227–230.
  11. А.В.Гребенников, В.И.Кокорин, И.Н.Сушкин, М.К.Чмых. Навигационно-информационный комплекс автоматизированной системы управления движением поездов. В сб.: Спутниковые системы связи и навигации.– г. Красноярск, 1997, с 189–193.
  12. И.Н.Сушкин. Определение координат подвижных объектов по сигналам спутниковых навигационных систем с учетом априорной информации о маршруте движения. В сб.: Спутниковые системы связи и навигации.– г. Красноярск, 1997, с 193–199.
  13. В.Н.Авсиевич, А.В.Гребенников, И.Н.Сушкин, Ю.Л.Фатеев. Аппаратура определения пространственной ориентации объектов. В сб.: Радиолокация, навигация и связь.– Воронеж, 1998, с 1137–1141.
  14. В.Н.Авсиевич, А.И.Голенок, И.Н.Сушкин, М.К.Чмых. Многоканальная аппаратура потребителя спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS – выбор процессора вычислительного блока. Всероссийская научно-техническая конференция современные проблемы радиоэлектроники, Красноярск 1999 г.
  15. В.Н.Авсиевич, А.И.Голенок, И.Н.Сушкин, М.К.Чмых. Применение глобальных навигационных спутниковых систем на железнодорожном транспорте. Всероссийская научно-техническая конференция современные проблемы радиоэлектроники, Красноярск 1999 г.
  16. В.Н.Авсиевич, А.В.Гребенников, И.Н.Сушкин, М.К.Чмых. Опыт создания и перспективы развития аппаратуры потребителя глобальных навигационных спутниковых систем. В сб.: Радиолокация, навигация и связь.– г. Воронеж, 1999, с 1127–1132.
  17. В.Н.Авсиевич, А.В.Гребенников, И.Н.Сушкин, М.К.Чмых. Опыт создания и перспективы развития навигационной аппаратуры ГЛОНАСС/GPS. И сб.: Достижение науки и техники-развитию сибирских регионов.– г. Красноярск, 2000, с 22–24.
  18. В.Н.Авсиевич, А.В.Гребенников, И.Н.Сушкин, М.К.Чмых. Опыт использования аппаратуры МРК-23 в системах синхронизации. В сб.: Достижение науки и техники-развитию сибирских регионов.– г. Красноярск, 2000, с 24–25.
  19. Пеленгатор. Патент РФ №2099732 опубл. 20.12.97 в бюл. № 35.

20. А.И. Васекин, В.М. Зенченко, А.В. Гребенников, В.И. Кокорин, В.Б. Новиков, И.Н. Сушкин. Опыт внедрения аппаратуры спутниковых навигационных систем в технологии управления железнодорожным транспортом. В сб.: Трансиб-99.- г. Новосибирск, 1999, с 160-162.
21. V.N. Avsiyevich, Ju.L. Fateev, A.V. Grebennikov, V.I. Kokorin, V.B. Novikov, I.N. Sushkin. Global Navigation Satellite Systems' User Equipment: Creation Experience and Application Prospects. 7<sup>th</sup> Saint Petersburg international conference on integrated navigation systems. Saint Petersburg may 2000.

СОИСКАТЕЛЬ :



Тираж 100 экз. Заказ № 478.

Отпечатано в типографии КГТУ

660074, Красноярск, ул. Киренского, 26