

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАТИКИ  
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра радиотехнических систем

СИСТЕМЫ РАДИОНАВИГАЦИИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторной работе

Исследование точностных характеристик аппаратуры потребителей  
GPS

для студентов специальности

39 01 02 «Радиоэлектронные системы» дневной формы обучения

Минск 2003

УДК [621.396.98:629.783]  
ББК 32.95 я 73  
М 54

Составитель О. В. Шабров

«Системы радионавигации». Метод. указания к лабораторной работе «исследование точностных характеристик аппаратуры потребителей GPS» по для студентов специальности 39 01 02 «Радиоэлектронные системы»/ Сост. О.В. Шабров. - Мн.: БГУИР, 2003.- 24 с.: ил.

Методические указания содержат теоретические сведения, описание архитектуры GPS-приемника Lassen SK II, порядок выполнения лабораторной работы.

УДК [621.396.98:629.783]  
ББК 32.95 я 73

© Шабров О.В.  
составление, 2003  
© БГУИР, 2003

## Содержание

1. Краткие теоретические сведения.

Обобщенная структурная схема аппаратуры потребителей СРНС

2. Информационные потоки в АП

3. Измеряемые радионавигационные параметры

4. Источники погрешностей и точность

навигационно-временных определений в СРНС

5. Погрешности, вносимые на НС и КИК

6. Погрешности, вносимые на трассе НС – потребитель

7. Погрешности, вносимые приемником СРНС

8. Архитектура навигационного GPS приемника Lassen SK II

9. Порядок выполнения работы.

Литература

Библиотека БГУИР

Цель работы:

- ознакомиться с принципами координатно-временных определений с помощью глобальной спутниковой радионавигационной системы GPS (Global Positioning System);
- ознакомиться с принципами построения и функционирования аппаратуры потребителей спутниковой радионавигационной системы GPS;
- оценить точностные характеристики измерения координат аппаратурой потребителя GPS в автономном режиме на примере встраиваемого GPS-приемника фирмы Trimble Navigations.

## **1. Краткие теоретические сведения**

### **Обобщенная структурная схема аппаратуры потребителей СРНС**

Аппаратура потребителей (АП) предназначена для определения пространственных координат и параметров движения объекта навигации по результатам измерений при использовании информации, содержащейся в кадре принимаемых от НИСЗ радиосигналов. При этом под параметрами движения понимаются три составляющие вектора скорости, в частом случае – составляющие вектора ускорения, а также производные от них параметры, нужные для управления движением объектов. С учетом специфики функционирования спутниковых радионавигационных систем к определяемым параметрам относят также поправки к шкалам времени и частоты местного собственного хранителя времени и опорного генератора.

Для решения своей основной задачи АП принимает излучаемые каждым НИСЗ радиосигналы, производит синхронизацию по всем компонентам модуляции радиосигналов, измеряет радионавигационные параметры этих радиосигналов, выделяет навигационное сообщение от каждого из НИСЗ и обрабатывает полученную информацию, преобразуя ее в оценки координат и

параметров движения. Весь этот процесс называют навигационно-временным определением (НВО).

На рис.1 изображена обобщенная структурная схема АП, в состав которой входят антенна, СВЧ усилитель и преобразователь радиосигналов, аналого-цифровой процессор первичной обработки принимаемых сигналов (с блоками поиска, слежения, навигационных измерений и выделения навигационных сообщений), навигационный процессор, интерфейс или блок обмена информацией, опорный генератор (ОГ) и синтезатор частот, источник питания, пульт управления и индикации блок управления антенной. Штриховыми линиями выделены блоки, наличие которых в составе АП не является обязательным, а определяется спецификой его применения. Так как АП может быть полностью автоматизирована и не нуждается в пульте управления, то наличие пульта управления и индикации относится к тем случаям, когда потребителем выходной информации является непосредственно оператор. Блок управления антенной используется в тех комплектациях АП, в которых антенна для удовлетворения высоким требованиям помехоустойчивости обладает пространственной селекцией и требует управления. Этот блок позволяет управлять диаграммой направленности антенны, формируя, например, провалы диаграммы в направлении на источники помех.

Рассмотрим основные задачи, решаемые функциональными блоками АП.

Антенна улавливает электромагнитные колебания, излучаемые НИСЗ, и направляет их на вход СВЧ усилителя и преобразователя. В зависимости от структуры СРНС, частотного диапазона, назначения АП и вида потребителя, на котором она устанавливается, могут применяться антенны с различными диаграммами направленности – от слабонаправленной с неизменяемой (или изменяемой) конфигурацией направленности до узконаправленной с шириной лучей в единицы градусов и изменяемым в пространстве направлением.

Поскольку в СРНС «Глонасс» и GPS используются «энергетически скрытые» сигналы», радиочастотные усилители АП должны обладать очень высокой чувствительностью. Шумовая температура современных входных радиоусилителей АП диапазона 1,6 ГГц приближается к 300 К. Как правило, радиочастотный преобразователь АП имеет две-три ступени преобразования частоты с усилением до 120...140 дБ, причем в большинстве типов АП независимо от числа ее каналов первый преобразователь частоты всегда один. Число преобразователей второй и третьей ступени зависит от числа каналов АП и ее конкретного схемотехнического решения.

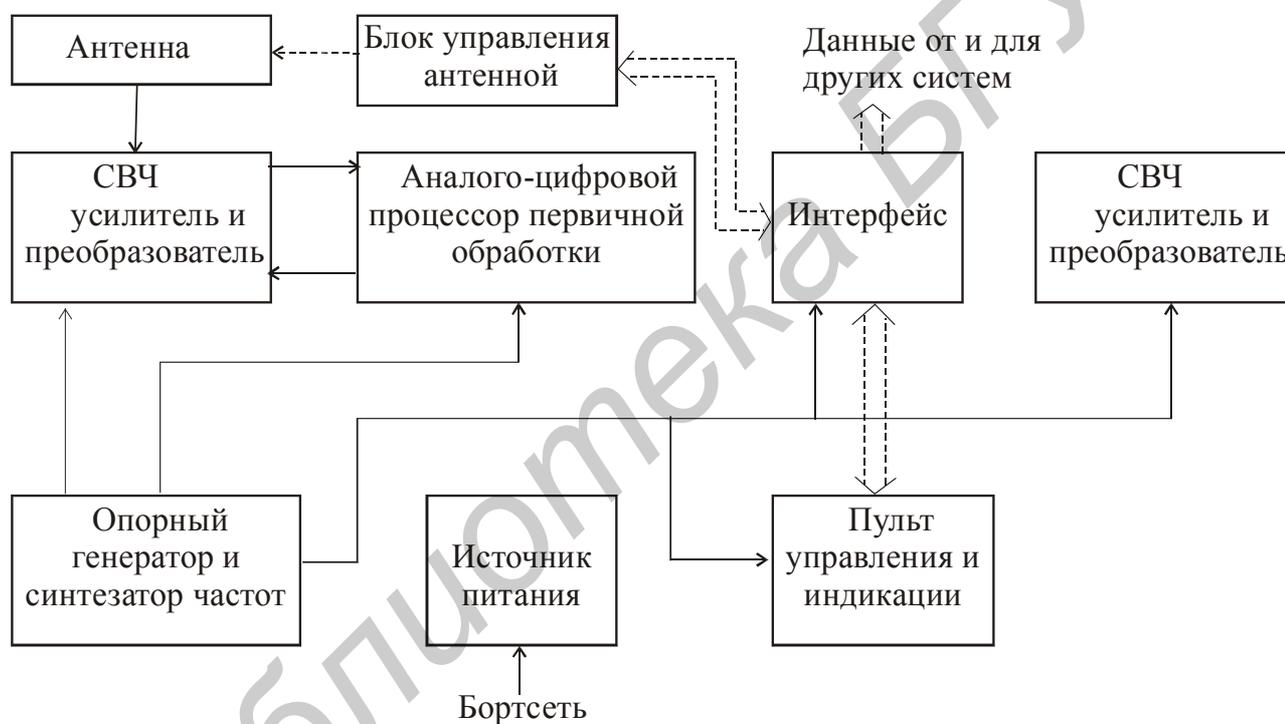


Рис.1. Обобщенная структурная схема АП

Аналого-цифровой процессор первичной обработки решает задачи поиска фаз (т.е. задержек) манипулирующих псевдослучайных последовательностей (ПСП); слежения за задержкой ПСП, слежение за фазой и частотой принимаемых радиосигналов; выделения навигационных сообщений.

Число каналов поиска, слежения и выделения сообщений равно числу каналов АП.

Большие научно-технические достижения в области создания микропроцессоров, БИС памяти и сверхбольших интегральных микросхем на базовых матричных кристаллах позволяют в настоящее время решать эти задачи, широко используя цифровые методы обработки радиосигналов в специализированных цифровых процессорах, встраиваемых в АП.

К задачам, решаемым навигационным процессором, относятся: выбор рабочего созвездия НИСЗ из числа видимых; расчет данных целеуказания по частоте и задержке манипулирующей ПСП; декодирование навигационных сообщений, в том числе альманаха и эфемеридной информации; сглаживание или фильтрация измеряемых навигационных параметров; решение навигационно-временной задачи с выдачей координат и параметров движения объекта; фильтрация координат; комплексирование с данными автономных навигационных систем объекта; организация обмена информацией как внутри АП, так и с другими системами объекта; контроль работоспособности блоков и АП в целом.

В зависимости от типа АП навигационный процессор, реализуемый на микропроцессорах и микроЭВМ, может быть построен как по однопроцессорной, так и по многопроцессорной структуре, и выполнять также часть задач первичной обработки.

Кроме перечисленных задач, решение которых обеспечивает основную функцию АП, на навигационный процессор может быть возложено выполнение и ряда сервисных задач потребителя, таких, как расчет отклонения от траектории заданного движения, выработка информации о прохождении поворотных пунктов маршрута, решение прямой и обратной геодезических задач, преобразование координат из одной системы координат в другую.

Организацию последовательности вычислений и обмен информацией между функциональными блоками АП выполняют управляющие программы-

диспетчеры, построенные с использованием иерархии сигналов прерываний, вырабатываемых в АП. При разработке этих программ, как и всего математического обеспечения в целом, учитываются требования к точности и надежности навигационно-временных определений, а также возможности используемых вычислительных средств.

Для выбора рабочего созвездия НИСЗ и расчета априорных данных о навигационных параметрах, вводимых в устройства поиска и слежения, необходимо располагать текущими или априорными значениями параметров движения объекта, текущим временем и данными о параметрах движения НИСЗ. Последние представляют собой содержание альманаха. Данные альманаха извлекаются из репрограммируемой памяти навигационного процессора, где они хранятся после первоначального ввода вручную оператором с пульта управления и индикации. Другой путь ввода данных альманаха состоит в приеме альманаха первоначально от какого-либо первого НИСЗ, сигнал которого находится вслепую без целеуказания. В этом случае на поиск сигнала первого НИСЗ и на прием альманаха может потребоваться дополнительное время. Имеющийся в АП альманах обновляется автоматически при приеме сигналов при достижении им определенного «возраста», порядка нескольких дней.

Важными элементами АП являются опорный генератор и синтезатор частот, к которым предъявляются достаточно высокие требования стабильности частоты ( $10^{-7}$  долговременная и  $10^{-10} \dots 10^{-11}$  кратковременная) и чистоты спектров синтезируемых сигналов.

## **2. Информационные потоки в АП**

Работа АП в реальном масштабе времени характеризуется чрезвычайной насыщенностью обмена потоками информации между основными блоками структурной схемы АП на рис.2. Все процессы обработки сигналов и

информации в АП условно принято разделять на две основные категории: первичную и вторичную обработки.

Под первичной (ПО) понимают обработку принимаемых радиосигналов, конечным продуктом которой являются измеренные значения навигационных параметров радиосигналов, т.е. квазидальности и радиальные квазискорости, а также выделенные биты и слова служебного информационного сообщения, содержащиеся в радиосигнале.

Под вторичной обработкой (ВТО) понимают процесс преобразования выходной информации ПО в значения координат и параметров движения объекта в результате решения навигационно-временной задачи, а также вспомогательные процессы: обратное преобразование априорных и оценочных значений координат и параметров движения в квазидальности и квазискорости, короткий прогноз эфемерид НИСЗ, выбор рабочих созвездий НМСЗ, решение сервисных задач и т.п.

Обмен информацией в АП происходит между аппаратными и программными блоками ПО и ВТО, между ВТО и автономными навигационными средствами и другими бортовыми средствами и системами объекта, между оператором и ВТО. Циркулирующие в АП потоки информации представлены на рис.2.

От НИСЗ с помощью радиосигнала в ПО поступает входная информация в виде кодовых последовательностей ( $C/A$  и  $P$ ) и служебной информации, передаваемой кадром радиосигнала (альманах, эфемериды, метки времени, временные и частотные поправки, служебные слова и т.п.).

Из блоков ПО в блоки ВТО передаются измеренные значения квазидальности и радиальной квазискорости, метки шкал времени НИСЗ, кадр служебной информации, сигналы прерываний, данные встроенного контроля, характеристики работоспособности узлов и блоков ПО, характеристики помеховой обстановки.

Блоки ВТО выдают в блоки ПО команды управления и предписания как для начала работы ПО, так и в течение всех последующих этапов работы. Эта информация содержит номера НИСЗ рабочего созвездия, номера запасных НИСЗ, сигналы которых необходимо принимать, данные целеуказаний в виде прогнозируемых значений квазидальности, радиальной квазискорости, фазы ПСП, режимы и подрежимы работы.

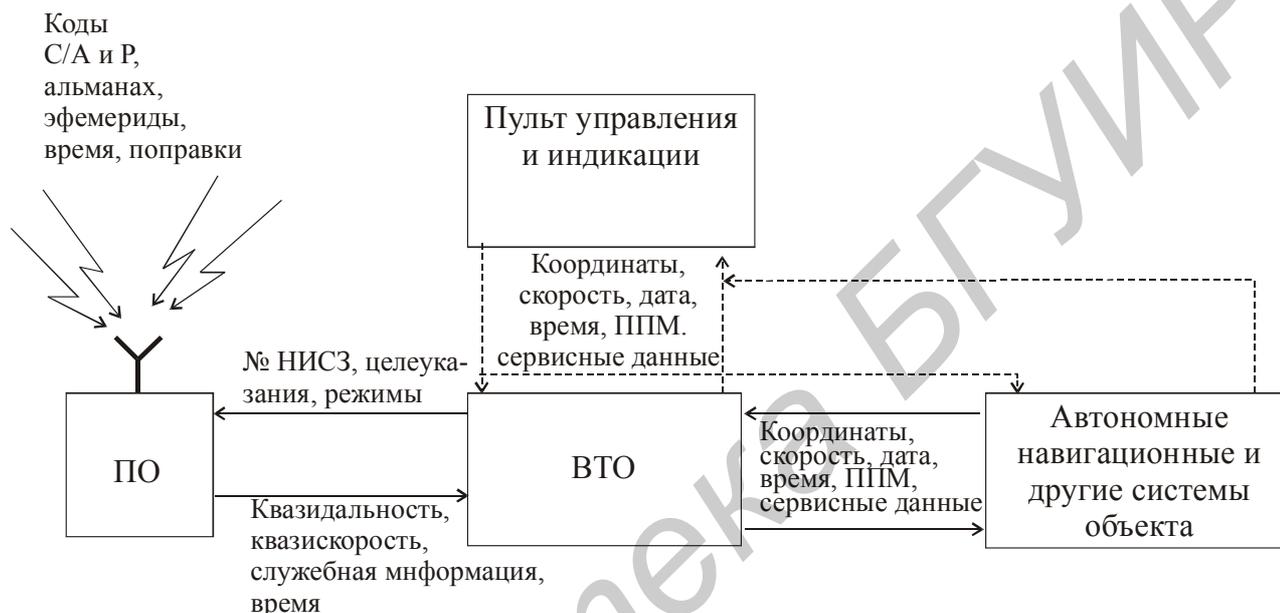


Рис.2. Информационные потоки в бортовой АП

После обработки принятой информации путем решения соответствующих задач выходная информация ВТО выдается на пульт индикации и в системы объекта, являющиеся непосредственными потребителями информации АП.

### 3. Измеряемые радионавигационные параметры

Сложный ФМ-сигнал, излучаемый НИСЗ, в точке приема приобретает вид

$$s(t - \tau_i) = A'_p [P_i(t - \tau_i) \oplus D_{pi}(t - \tau_i)] \cos[(\omega_i + \Delta\omega_{di})(t - \tau_i) + \varphi'_i] + A'_c [G_i(t - \tau_i) \oplus D_{ci}(t - \tau_i)] \sin[(\omega_i + \Delta\omega_{di})(t - \tau_i) + \varphi'_i] \quad (1)$$

где  $A'_p$  и  $A'_c$  — амплитуды сигналов соответственно  $P$  и  $C/A$  в точке приема;  $P_i(t - \tau_i)$  и  $G_i(t - \tau_i)$  — дальномерные коды ПСП соответственно сигналов  $P$  и  $C/A$   $i$ -го НИСЗ;  $D_{pi}(t - \tau_i)$  и  $D_{ci}(t - \tau_i)$  — потоки информационных сообщений  $i$ -го НИСЗ;  $\omega_i$  и  $\Delta\omega_{di}$  — несущая частота и доплеровский сдвиг частоты несущей  $i$ -го НИСЗ;  $\varphi'_i$  — начальная фаза несущей  $i$ -го НИСЗ;  $\tau_i$  — задержка распространения радиосигнала  $i$ -го НИСЗ.

Измеряемыми радионавигационными параметрами радиосигнала являются  $\tau_i$  и  $\Delta\omega_{di}$ , причем измерения проводятся относительно шкалы времени хранителя времени АП и действительного значения частоты опорного генератора АП. С учетом этого измеряемые радионавигационные параметры можно представить выражениями

$$\tau_i(t) = \frac{r_{0i}(t)}{c} + \tau_n(t) - \tau_{in} + \Delta\tau_p(t) + \delta_{\tau i}, \quad (2)$$

$$\Delta\omega_{di}(t) = \omega_i \frac{v_i(t)}{c} + \Delta\omega_{in}(t) + \Delta\omega_p(t) + \delta_{\omega i}, \quad (3)$$

где  $r_{0i}(t)$  — геометрическая дальность потребитель —  $i$ -й НИСЗ;  $\tau_n(t)$  — неизвестный временной сдвиг шкалы времени хранителя времени АП относительно системного времени;  $\tau_{in}$  — временной сдвиг шкалы времени хранителя времени  $i$ -го НИСЗ относительно системного времени;  $\Delta\tau_p(t)$  — погрешности, возникающие в канале распространения радиосигнала;  $\delta_{\tau i}$  — погрешности измерительного устройства задержки;  $v_i(t)$  — скорость движения  $i$ -го НИСЗ относительно потребителя;  $\Delta\omega_{in}(t)$  — сдвиг действительного значения частоты опорного генератора АП относительно номинала частоты опорного генератора  $i$ -го НИСЗ;  $\Delta\omega_p(t)$  — частотные

сдвиги несущей, возникающие в канале распространения;  $\delta_{\omega_i}$  — погрешности измерительного устройства частоты АП;  $c$  — скорость света.

В (2) и (3) значения  $\tau_{in}$ ,  $\Delta\tau_p$ ,  $\Delta\omega_p$ ,  $c$  известны либо из альманаха, либо из расчета. Поэтому оцениваемыми навигационными параметрами являются квазидальность  $\tilde{r}_{0i}(t) = r_{0i}(t) + c\tau_n(t)$  и радиальная квазискорость

$$\tilde{v}_i(t) = c \frac{\Delta\tilde{\omega}_{di}(t) - \Delta\omega_{in}(t)}{\omega_i}.$$

Навигационные параметры изменяются непрерывно во времени вследствие взаимного перемещения НИСЗ и потребителя, поэтому  $\tilde{r}_{0i}(t)$  и  $\tilde{v}_i(t)$  можно представить в зависимости от координат НИСЗ и П (рис.3).

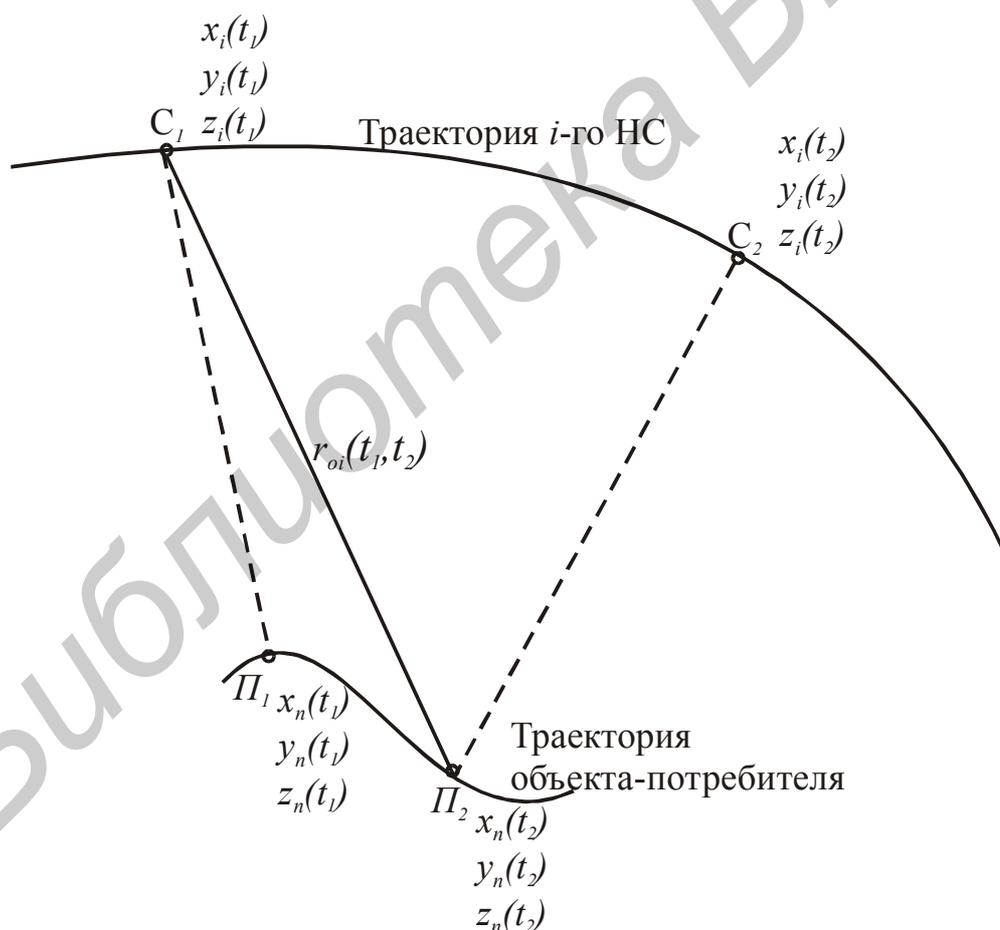


Рис.3. Взаимное расположение НС (точка С) и потребителя (точка П) в моменты излучения и приема радиосигнала:  $t_1$ -момент излучения,  $t_1$ -момент приема;  $r_{oi}$ -измеряемая геометрическая дальность

Квазидальность

$$r_{oi}(t_1, t_2) = \sqrt{[x_i(t_1) - x_n(t_2)]^2 + [y_i(t_1) - y_n(t_2)]^2 + [z_i(t_1) - z_n(t_2)]^2}, \quad (4)$$

где  $x_i(t_1)$ ,  $y_i(t_1)$ ,  $z_i(t_1)$  и  $x_n(t_2)$ ,  $y_n(t_2)$ ,  $z_n(t_2)$  — прямоугольные гринвичские координаты соответственно  $i$ -го НИСЗ в момент излучения  $t_1$  и объекта в момент времени приема радиосигнала  $t_2$ , причем  $t_i(t) = t_2 - t_1 = r_{oi}(t)/c + \tau_n(t)$ .

Из рис.3. видно, что за время распространения сигнала  $r_{oi}(t)/c$  НИСЗ и потребитель изменили свои координаты. Это изменение необходимо учитывать при составлении и решении навигационных уравнений.

#### **4. Источники погрешностей и точность навигационно-временных определений в СРНС**

На точность определения потребителем СРНС координат местоположения, высоты, скорости, времени и других параметров влияет множество факторов. Они связаны с особенностями первичных и вторичных навигационных измерений, с характеристиками используемых сигналов, среды распространения и т.д. Приведем основные источники погрешностей измерений применительно к псевдодальномерному методу навигационно-временных определений.

Под псевдодальностью от  $i$ -го НС до потребителя понимают измеренную дальность  $D_{изм.i}$  до этого НС, отличающуюся от истинной дальности  $D_i$  на неизвестную, но постоянную за время определения навигационных параметров величину  $D'$ . Таким образом, для псевдодальности до  $i$ -го НС можно записать

$$D_{изм.i} = D_i + D' = \left[ (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 \right]^{1/2} + D'. \quad (5)$$

В выражении (5) дальномерная погрешность  $\delta_{дали}$  представлена лишь одной составляющей  $D'$ . Однако существуют и другие составляющие дальномерной погрешности, которые в зависимости от причины их происхождения можно разделить на три группы: погрешности  $\delta D_{НСi}$ , вносимые на  $i$ -м НС или КИК; погрешности  $\delta D_{mpi}$ , вносимые на трассе распространения сигнала  $i$ -го НС; погрешности  $\delta D_{ПИ}$ , вносимые в приемоиндикаторе СРНС.

Таким образом, в общем виде (5) можно записать как

$$D_{изм.i} = D_i + \delta_{дали} = D_i + D' + \delta D_{НСi} + \delta D_{mpi} + \delta D_{ПИ}.$$

## 5. Погрешности, вносимые на НС и КИК

**Погрешности частотно-временного обеспечения.** Погрешности частотно-временного обеспечения НС возникают вследствие несовершенства процедур сверки и хранения бортовой шкалы времени НС. Они проявляются, например, в смещении фаз излучаемых дальномерных кодов и меток времени, что приводит к погрешностям измерения расстояния до спутника и расчета его координат. Например, временной сдвиг в 1 мс может привести к эквивалентной дальномерной погрешности в 300 км.

Смещение БШВ определяется, в частности, характеристиками стабильности частоты опорного генератора БЭЧВ, расположенного на НС, и задержками в аппаратуре НС. Для типовых БЭЧВ изменение дисперсии ошибки формирования БШВ, вызванное смещениями частоты ОГ между моментами коррекции, можно аппроксимировать следующим образом [2]:

$$\text{для рубидиевых БЭЧВ } \sigma^2(t) = 10^{-20}(t - t_k) + 1,44 \cdot 10^{-24}(t - t_k)^2;$$

$$\text{для цезиевых БЭЧВ } \sigma^2(t) = 2,5 \cdot 10^{-21}(t - t_k) + 5,76 \cdot 10^{-26}(t - t_k)^2,$$

где  $t$  – текущее время;  $t_k$  – время коррекции БЭЧВ.

Отсюда видно, что СКО сдвига БШВ составляет примерно 9 нс через 2 ч и 25,4 (для цезиевых) ... 108 нс (для рубидиевых БЭЧВ).

Командно-измерительный комплекс СРНС корректирует БШВ таким образом, чтобы СКО сдвига БШВ не превосходила 10 нс. Кроме того, на КИК формируется модель ухода БШВ в промежутках между аппаратной коррекцией. Ее параметры передаются потребителям в служебном сообщении НС для обеспечения алгоритмической коррекции БШВ. При этом непрогнозируемые отклонения формируемой на борту НС БШВ относительно шкалы времени системы могут достигать 1 нс на интервале в 1 ч.

**Погрешности эфемеридного обеспечения.** Эфемеридные погрешности навигационно-временных определений вызваны неточностью определения параметров орбит НС относительно экстраполированной орбиты. Так же, как и погрешности часов спутника, эти погрешности можно пересчитать в соответствующую (эфемеридную) компоненту эквивалентной дальномерной погрешности ЭПД. В СРНС GPS среднеквадратическое значение эфемеридных составляющих ЭПД составляет примерно 1 м.

Достоверность передаваемых со спутника частотно-временных поправок и эфемерид зависит также от срока, прошедшего с момента их закладки в память бортовой ЭВМ, т.е. от «возраста» данных. Например, погрешность определения местоположения спутника по данным альманаха составляет 900 м ( $1\sigma$ ) при «возрасте» данных альманаха 1 день, 1200 м – 1 неделя и 3600 м – 2 недели.

## **6. Погрешности, вносимые на трассе НС – потребитель**

Вторая группа погрешностей вызвана неточным знанием условий распространения радиоволн в атмосфере Земли. В атмосфере выделяют несколько слоев, отличающихся своими свойствами. Нижний слой, расположенный над поверхностью Земли, называют *тропосферой*, высота которой 8 – 18 км. Слой атмосферы от 60...90 км до 500...1000 км называют

*ионосферой*. Эти два слоя оказывают заметное влияние на качество навигационных измерений в СРНС, которое проявляется в основном в дополнительных задержках сигнала, возникающих из-за рефракции сигналов спутника (искривлении траектории распространения радиоволн) при прохождении атмосферы Земли.

**Тропосферные погрешности.** Основная составляющая тропосферной погрешности навигационных определений в СРНС обусловлена наличием тропосферной рефракции сигналов НС, которая вызвана неоднородностями и изменением ее диэлектрической проницаемости и, следовательно, показателя преломления с изменением высоты. Дополнительная задержка сигнала НС в тропосфере может достигать 8...80 нс и не зависит от частоты сигнала, поэтому не может быть устранена двухчастотным методом. Однако значение тропосферной погрешности зависит от факторов, которые достаточно точно известны и прогнозируются (взаимные координаты НС и потребителя, температура, давление, влажность воздуха). Для средних метеоусловий

$$\Delta t_{\text{трон}} \approx \frac{K_t}{\sin \beta} \int_0^{ST} (n - 1) ds,$$

где  $K_t$  – параметр, характеризующий состояние тропосферы;  $\beta$  – угол места (возвышения) НС;  $n$  – коэффициент преломления радиоволн;  $ST$  – длина тропосферного участка радиотрассы.

Используемые в СРНС модели тропосферы позволяют уменьшить эти погрешности до единиц наносекунд.

**Ионосферные погрешности.** Рефракция сигналов СРНС в ионосфере вызвана неоднородностями и изменением ее диэлектрической проницаемости с изменением высоты. Дополнительная задержка в ионосфере  $\Delta t_{\text{ион}}$  сигнала НС с частотой  $f$  по сравнению с задержкой сигнала при прямолинейном распространении оценивается

$$\Delta t_{\text{ион}} = \frac{A}{f^2} + \frac{B}{f^3} + \frac{C}{f^4} + \dots \approx \frac{A}{f^2},$$

где  $A, B, C$  – коэффициенты, характеризующие свойства среды распространения радиоволн.

Значение задержки изменяется в широких пределах в зависимости от района Земли, где расположен потребитель, времени суток, года, солнечной и геомагнитной активности и т. д., и составляет 5...500 нс. Среднее значение  $\Delta t_{\text{ион}}$  на частоте средневысотной СРНС (1,6 ГГц) составляет 5...10 нс ночью и 30...50 нс днем для углов места НС  $\gamma_{\text{НС}}$ , близких к  $90^\circ$ , а при  $\gamma_{\text{НС}} < 15^\circ$  возрастает в 2...3 раза.

В настоящее время известны следующие методы определения и учета  $\Delta t_{\text{ион}}$ : моделирование условий на трассе распространения сигналов НС; двухчастотное измерение; избыточные одночастотные измерения.

Метод моделирования трассы. Этим методом рассчитывают ионосферную задержку с использованием известных функциональных зависимостей ее значения от параметров атмосферы на соответствующем участке радиотрассы. В СРНС GPS ионосферная задержка аппроксимируется соотношением вида  $\Delta t_{\text{ион}} = \Delta t_{\text{н}} + \Delta t_{\text{дн}}$ . Здесь  $\Delta t_{\text{н}} = 5 \text{ нс}$  – суточная константа (соответствующая ночным условиям);  $\Delta t_{\text{дн}} = A_{\text{дн}} \cos(2\pi(t - t_{\text{дн}})/T_{\text{дн}})$  – переменная составляющая задержки (соответствующая дневной ионосфере);  $A_{\text{дн}}, T_{\text{дн}}, t_{\text{дн}} = 50400 \text{ с}$  – амплитуда, период и фаза составляющей задержки;  $t$  – местное время в точке расположения потребителя, рассчитанное на основе полученного со спутника системного времени и ориентировочных координат потребителя.

Для вычисления параметров  $A_{\text{дн}}, T_{\text{дн}}$  используют полиномы третьей степени:

$$A_{\text{дн}} = \sum \alpha_i \Phi^i; \quad T_{\text{дн}} = \sum \beta_i \Phi^i,$$

где  $\alpha_i, \beta_i$  – коэффициенты модели ионосферы, передаваемые для каждого спутника в навигационном сообщении;  $\Phi^i$  – геомагнитная широта подионосферной точки.

Приведенный алгоритм справедлив для усредненных составляющих задержки и обеспечивает ориентировочно 50 %-ную компенсацию подобных компонентов.

Двухчастотный метод. Коррекцию псевдодальномерных измерений можно осуществлять по следующему правилу. Сначала необходимо измерить псевдодальности  $D_{изм.i}(f_1)$  и  $D_{изм.i}(f_2)$  до  $i$ -го НС на двух частотах  $f_1$  и  $f_2$ , а затем вычислить разность задержек этих сигналов на трассе  $\Delta t_{ион} = (D_{изм.i}(f_2) - D_{изм.i}(f_1)) / c$ , равную разности дополнительных групповых задержек в ионосфере  $\Delta t_{ион1}$  и  $\Delta t_{ион2}$  на этих частотах. В результате можно записать соотношение

$$\Delta t_{ион1} = \delta t_{ион} \left( (f_1 / f_2)^2 - 1 \right)^{-1} \approx \begin{cases} 1,546 \delta t_{ион1} & \text{для GPS,} \\ 1,531 \delta t_{ион1} & \text{для Глонасс,} \end{cases}$$

где  $f_1 / f_2 = 77 / 60 \approx 1,283$  (для GPS) и  $f_1 / f_2 = 9 / 7 \approx 1,2857$  (для Глонасс), – значения, которые используют для коррекции псевдодальности  $D_{изм.i}$  на частоте  $f_1$ .

Остаточная погрешность двухчастотного метода, вызванная используемыми допущениями, пропорциональна  $1 / \sin \gamma_{НС}$  и равна 1...2 м при  $\gamma_{НС} < 10^\circ$ . В лучшем случае она составляет десятки сантиметров.

Рассматриваемый метод наиболее точный, однако требует высокоточных измерений на двух частотах, что значительно усложняет аппаратуру и, кроме того, приводит к значительному возрастанию шумовой погрешности.

Метод избыточных одночастотных измерений. В этом случае проводятся измерения по сигналам нескольких НС (обычно более восьми). Здесь за счет усреднения пространственных характеристик ионосферы можно достичь

значительного снижения ее влияния на точность измерения координат потребителей. Для стационарного потребителя такая методика дает выигрыш в точности на несколько порядков.

**Погрешности из-за многолучевости.** На приемную антенну аппаратуры потребителя СРНС может поступать не только прямой сигнал от навигационного спутника, но и множество переотраженных сигналов от земной и морской поверхностей и близлежащих объектов, например, зданий. Для авиационного потребителя СРНС задержка отраженного сигнала может составлять  $2/3 \dots 160$  мкс для спутника, находящегося в зените; при небольших углах возвышения спутника это значение уменьшается на порядок. Уровень отраженного сигнала может быть соизмеримым с прямым сигналом. Это приводит к существенным искажениям полезного сигнала и к погрешностям в схемах слежения за параметрами этого сигнала (задержкой, частотой, фазой). Эти погрешности во многом зависят от взаимного расположения спутника, приемной антенны и отражающих объектов. Экспериментальные исследования показали большой разброс значений дальномерной погрешности из-за многолучевости, которая составляет  $0,5 \dots 2$  м в лучшем случае (при использовании специальных антенн) и до  $100$  м в худшем, в городских условиях с высотными зданиями. Использование в последней ситуации приемников сигналов стандартной точности (C/A – сигналов СРНС GPS) с узкополосными корреляторами может снизить погрешности на порядок. Кроме того, использование высокоточных сигналов (например P(Y) – сигналов СРНС GPS) позволяет снизить погрешности из-за многолучевости в среднем до  $1 \dots 3$  м и в наихудшей ситуации до  $8$  м ( $1 \sigma$ ).

В наиболее неблагоприятных ситуациях может произойти срыв слежения в следящих системах, особенно фазовых.

## 7. Погрешности, вносимые приемником СРНС

К дальномерным погрешностям, обусловленным аппаратурой потребителя, можно отнести погрешности слежения за моментом прихода (временного положения) сигнала спутника, при этом основной вклад вносят шумовые и динамические погрешности схем слежения за задержкой огибающей (ССЗ) и несущей (ЧАП и ФАП) сигналов спутников.

Шумовая и динамическая погрешности. Типовая некогерентная схема слежения за задержкой, использующая огибающую спутникового сигнала (двоичную псевдослучайную последовательность), может характеризоваться шумовой погрешностью с СКО [3]

$$\sigma = \tau_s \left( B_t / (P/N_o) + B_t B_r / (P/N_o)^2 \right)^{1/2}.$$

Здесь  $\tau_s$  – длительность элементарного символа ПСП дальномерного кода ( $\tau_s \approx 0,1$  мкс), что эквивалентно 29,32 м, для  $P(Y)$  – кода и  $\tau_s \approx 1$  мкс (293,2 м) для  $C/A$  – кода GPS соответственно);  $B_t$  – односторонняя ширина полосы пропускания замкнутой ССЗ;  $B_r$  – односторонняя ширина полосы пропускания тракта промежуточной частоты;  $P/N_o$  – отношения мощности сигнала к спектральной плотности мощности шума на входе приемника (расчетное значение равно 38,4 дБГц для  $C/A$ -кода GPS). При использовании ССЗ с  $\tau$ -качением следует учитывать дополнительные потери до 6 дБ.

Погрешности квантования измеряемой дальности могут составлять 0,27 м и 2,66 м с учетом шага квантования, равного  $1/64 \tau_s$ .

С учетом этого типовая погрешность ПИ ( $1\sigma$ ), обусловленная шумами и квантованием, составляет приблизительно 0,2...1 м и 1,5...10 м (для  $P(Y)$  и  $C/A$  – кода СРНС GPS соответственно).

Динамическую составляющую дальномерной погрешности ПИ можно оценить как  $\varepsilon_{дин} = 1,12\ddot{\tau} / 4B_t^2$ . Это соотношение справедливо для установившегося режима ССЗ второго порядка при квадратичном законе изменения задержки сигнала  $\tau$ .

Суммарное значение аппаратной составляющей дальномерной погрешности  $(\sigma_{ин}^2 + \varepsilon_{дин}^2)^{1/2} = 0,1 \tau$ , при полосе  $B_f=3\text{Гц}$  и  $P/N_0=30$  дБГц.

Библиотека БГУИР

## 8. Архитектура навигационного GPS приемника Lassen SK II

GPS-модуль Lassen SK II является одной из последних разработок фирмы Trimble и предназначен для встраиваемых применений. Как и большинство приемников данного класса построен на двух специализированных микросхемах: радиочастотном усилителе-преобразователе (RF ASIC) и 8-ми канальном DSP процессоре с 32-х битным микроконтроллером.

Структурная схема GPS приемника Lassen SK II представлена на рис.4

Схема лабораторной установки

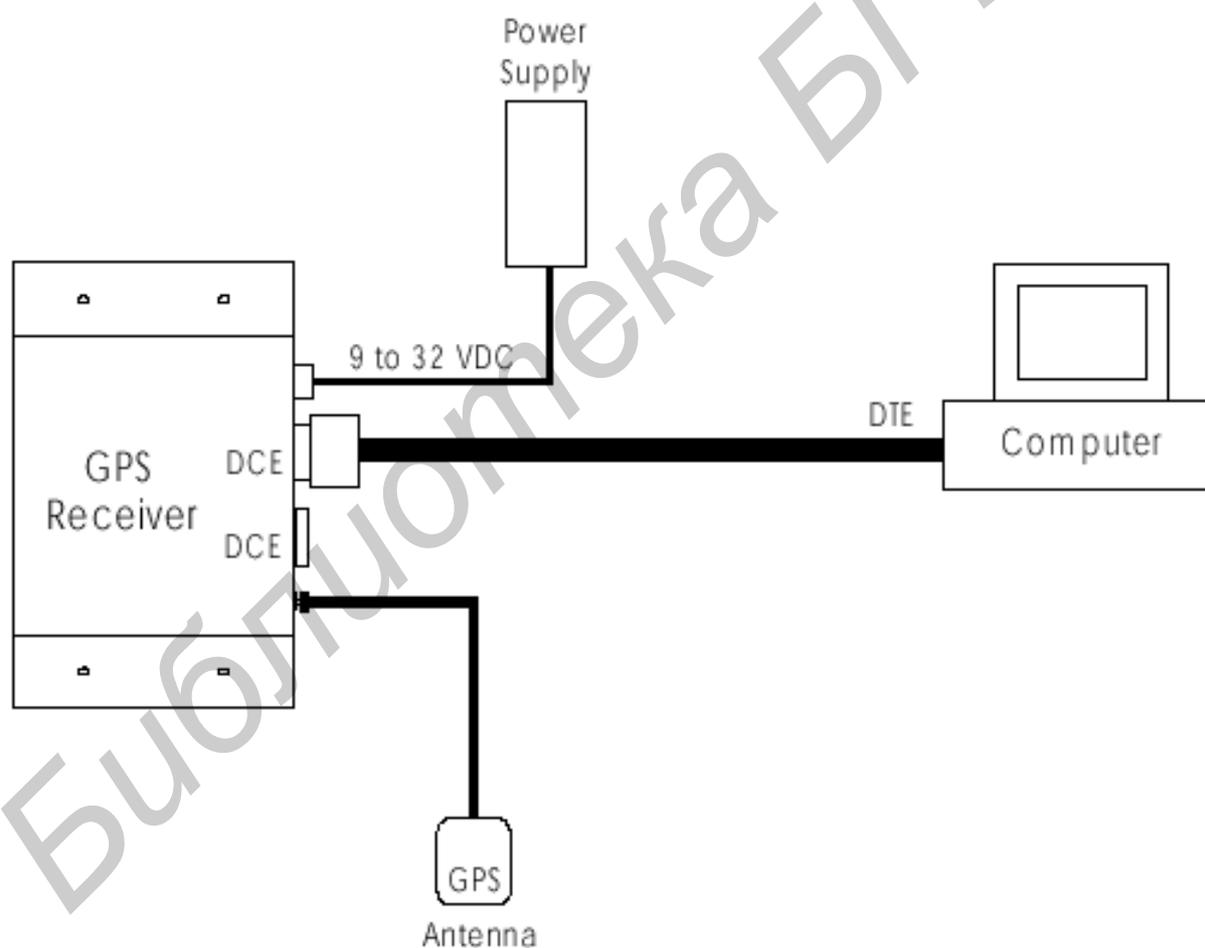


Рис.5. Схема лабораторной установки

## **9. Порядок выполнения работы.**

1. Включить установку.
2. Запустить программу Tsipchat.exe и произвести настройку параметров работы GPS приемника, пользуясь руководством по эксплуатации (получить у преподавателя)
3. Провести сеанс навигационных измерений с помощью GPS приемника по реальным сигналам спутников GPS, находящихся в данное время в зоне радиовидимости.
4. Перенести полученные результаты измерений (не менее 100 разовых измерений) в отчет.
5. Рассчитать ошибки измерения координат аппаратурой потребителя и построить графики зависимостей ошибок по каждой из координат во времени.
6. Построить гистограммы распределения ошибок измерения координат и оценить вид закона распределения этих ошибок.

Содержание отчета.

1. Формулировка цели работы.
2. Схема лабораторной установки.
3. Результаты экспериментальных исследований.
4. Результаты обработки экспериментальных исследований (графики, гистограммы, расчетные формулы).
5. Анализ полученных результатов и выводы.

### **Литература**

1. Сетевые спутниковые радионавигационные системы/ В.С. Шебшаевич, П.П. Дмитриев, Н.В. Иванцевич и др.; Под ред. В.С. Шебшаевича. 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Радио и связь, 1993.—408 с.: ил.
2. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС/ Под ред. В.Н.Харисова, А.И.Перова, В.А.Болдина. —М.: ИПРЖР, 1998. —400 с.: ил.
3. Руководство по эксплуатации Lassen SK II. Trimble Navigations, 2001.

Учебное издание

## **СИСТЕМЫ РАДИОНАВИГАЦИИ**

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к лабораторной работе

Исследование точностных характеристик аппаратуры потребителей  
системы GPS

для студентов специальности

39 01 02 «Радиоэлектронные системы» дневной формы обучения

Составитель

Шабров Олег Васильевич

Редактор Е.Н. Батурчик

---

Подписано в печать

Формат 60×84 1/16

Бумага

Печать гарнитура

Усл. печ. л.

Уч.-изд. л. 1,2

Тираж экз.

Заказ

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Учреждение образования

«Белорусский государственный университет информатики и  
радиоэлектроники»

Лицензия ЛП № 156 от 30.12.2002

Лицензия ЛВ № 509 от 03.08.2001

220013, Минск, П. Бровки, 6