

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра сетей и устройств телекоммуникаций

***АППАРАТУРА ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СПУТНИКОВЫХ  
РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ***

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к лабораторной работе  
по дисциплине «Сетевые технологии и сигнализация в телекоммуникациях»  
для студентов специальности  
I-45 01 03 «Сети телекоммуникаций»  
всех форм обучения

Минск 2006

УДК 621. 396. 96 (075. 8)  
ББК 32 . 95 я 73  
А 76

Составители:  
И.И. Астровский, А.Л. Земляков

**Аппаратура** потребителей спутниковых радионавигационных систем: Метод. указ. к лаб. работе по дисц. «Сетевые технологии и сигнализация в телекоммуникациях» для студ. спец. I-45 01 03 «Сети телекоммуникаций» всех форм обуч. / Сост. И.И. Астровский, А.Л. Земляков. – Мн.: БГУИР, 2006. – 27 с.: ил.

В издании рассматриваются виды аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем.

Даны рекомендации по выполнению лабораторной работы на персональной ЭВМ в диалоговом режиме. Программа составлена в соответствии с современными требованиями к программному продукту и обеспечивает необходимый сервис и защиту от неправильных действий пользователя.

Может быть использовано студентами, обучающимися по дисциплинам, связанным с цифровой обработкой сигналов в системах подвижной связи.

УДК 621. 396. 96 (075. 8)  
ББК 32 . 95 я 73

© Астровский И.И., Земляков А.Л.,  
составление, 2006  
© БГУИР, 2006

## Введение

Спутниковая радионавигация является одним из перспективных направлений прикладной космонавтики. Она обеспечивает качественно новый уровень координатно-временного обеспечения наземных, морских, воздушных и космических потребителей. Это подтверждается такими важными достоинствами современных спутниковых радионавигационных систем (СРНС) типа ГЛОНАСС и GPS (NAVSTAR), как глобальность рабочей зоны, неограниченная пропускная способность, скрытность, живучесть, беспрецедентно высокая точность и непрерывность измерений пространственных координат потребителей, их скорости движения и пространственной ориентации, текущего времени и т.д. Указанные свойства СРНС предопределили возможность рассмотрения вопроса об использовании в перспективе СРНС в качестве единственного средства для определения местоположения летательного аппарата (ЛА) и времени. В настоящее время предусматривается использование СРНС не только в целях навигации, но и для наблюдения за воздушным пространством в целях управления воздушным движением (УВД). Кроме того, предполагается использование СРНС для сокращения минимума эшелонирования, обеспечения опознавания ЛА в рамках реализации концепции координатно-временного опознавания ("свой чужой").

### 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СРНС

В состав СРНС входят три подсистемы:

- подсистема навигационных искусственных спутников Земли (НИСЗ);
- подсистема контроля и управления (наземный командно-измерительный комплекс (КИК));
- аппаратура навигационных потребителей (приемоиндикаторы).

В настоящее время считается целесообразным введение в состав СРНС функциональных структур, обнаруживающих и идентифицирующих нарушения в режимах работы СРНС, недопустимое ухудшение качества ее функционирования и своевременно предупреждающих об этом потребителей системы. Структура, способы функционирования и требуемые характеристики подсистем СРНС во многом зависят от требуемого качества навигационного обеспечения и выбранной концепции навигационных измерений.

Основные функции НИСЗ заключаются в формировании и излучении радиосигналов, необходимых для навигационных определений потребителей СРНС. Для этого в состав аппаратуры НИСЗ обычно входят: радиотехническое оборудование (передатчики навигационных сигналов и телеметрической информации, приемники данных и команд от КИК, антенны, блоки ориентации), ЭВМ, бортовой эталон времени и частоты (БЭВЧ), солнечные батареи и т.д.

Орбитальная конфигурация сети НИСЗ обеспечивает заданную рабочую зону, возможность реализации различных методов навигационно-временных определений (НВО), дискретность и точность НВО, диапазон изменения параметров радиосигналов НИСЗ и т.д. Так, например, увеличение высоты полета НИСЗ позволяет расширить зону прямой видимости и принимать сигналы НИСЗ на значительных территориях. И тогда несколько НИСЗ, расположенных на определенных орбитах, могут формировать сплошное, с точки зрения наземного и авиационного потребителя, радионавигационное поле (глобальную рабочую зону). В свою очередь соответствующие характеристики сигналов НИСЗ и способы их обработки позволяют проводить навигационные измерения с высокой точностью. Количество и пространственная расстановка видимых НИСЗ во многом обеспечивают точность НВО.

В современных СРНС большое внимание уделяется взаимной синхронизации сети НИСЗ по орбитальным координатам и излучаемым сигналам, что обусловило использование применительно к ним термина сетевые СРНС. КИК обеспечивает наблюдение и контроль за траекторией движения НИСЗ, качеством функционирования их аппаратуры, управление режимами ее работы и па-

раметрами спутниковых радиосигналов, составом, объемом и дискретностью передаваемой со спутников навигационной информации. Обычно КИК состоит из координационно-вычислительного центра (КВЦ), станций траекторных измерений (СТИ), станций управления (СУ), наземного (системного) эталона времени и частоты (СЭВЧ). Периодически, при полете НИСЗ в зоне видимости СУ, происходит закладка в память бортовой ЭВМ спутника наборов эфемерид и другой необходимой информации. Эти данные затем передаются потребителям в навигационном сообщении в виде кадров соответствующего формата.

Приемоиндикаторы (ПИ) СРНС предназначены для приема и обработки навигационных сигналов НИСЗ с целью определения необходимой потребителям информации. Обычно они состоят из радиоканала и вычислителя. Координаты НИСЗ определяются на КИК, так как существуют хорошо апробированные на практике методы и средства решения этой проблемы в наземных условиях. Однако, в современных СРНС управление НИСЗ осуществляется с ограниченных территорий и, следовательно, не обеспечивается постоянное взаимодействие КИК и сети НИСЗ. Поэтому можно выделить два этапа решения этой задачи.

На первом этапе аппаратура КИК сначала измеряет координаты спутников в процессе их пролета в зоне видимости и вычисляет параметры их орбит. Затем эти данные прогнозируются на фиксированные, т.н. опорные, моменты времени, например, на середину каждого часового интервала предстоящих суток до выработки следующего прогноза. Спрогнозированные таким образом координаты НИСЗ и их производные (т.н. эфемериды) передаются на НИСЗ, чтобы затем в виде навигационного (служебного) сообщения, соответствующего указанным моментам времени, последовательно передаваться потребителям.

На втором этапе в аппаратуре потребителя (АП) по этим данным осуществляется вторичное прогнозирование координат НИСЗ, т.е. вычисляются текущие координаты НИСЗ в интервалах между опорными точками траектории. Процедуры первичного и вторичного прогнозирования координат

осуществляются с учетом известных закономерностей движения НИСЗ. В отличие от самоопределяющихся НИСЗ, рассмотренный вариант функционирования СРНС обеспечивает упрощение аппаратуры спутников за счет упрощения структуры КИК с целью достижения заданной надежности системы.

Заметим, что КИК, кроме того, закладывает в навигационное сообщение НИСЗ так называемый альманах - набор справочных сведений о сети НИСЗ. Он, в частности, содержит загрубленные эфемериды НИСЗ, которые обычно используются лишь для определения видимых потребителю НИСЗ и выбора рабочего созвездия, обеспечивающего высокое качество НВО. Темп обновления точной эфемеридной информации (ЭИ) значительно выше, поэтому она называется часто оперативной ЭИ в отличие от долговременной ЭИ в альманахе.

В ПИ современных СРНС определение поверхностей (линий) положения осуществляется пассивным (беззапросным) способом путем измерения, например, доплеровского сдвига частоты и (или) времени распространения навигационных сигналов от НИСЗ до потребителя. Это обстоятельство объясняет неограниченную пропускную способность рассматриваемых СРНС и скрытность работы их потребителей. Таким образом, процедура навигационных определений в ПИ современных СРНС характеризуется многоэтапностью и включает в себя, как правило, измерение дальностей до НИСЗ и их производных, вычисление координат НИСЗ на момент измерений, вычисление координат потребителя, его скорости, текущего времени и др.

## **2. СПУТНИКОВАЯ РАДИОНАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА GPS (NAVSTAR)**

Орбитальная группировка в СРНС GPS состоит из 24 НИСЗ, расположенных на 6-ти круговых синхронных орбитах (по 4 НИСЗ на каждой) с наклоном  $55^\circ$ , периодом обращения 12 часов и высотой около 20 000 км над поверхностью Земли. Долготы восходящих узлов орбитальных плоскостей смещены друг относительно друга на  $60^\circ$ .

Спутники GPS передают два типа различных сигналов: сигнал точного кода, или P-код (с ноября 1994 года заменен на более криптостойкий Y-код), и сигнал грубого кода, или C/A код. P-код предназначен для использования санкционированными военными пользователями и обеспечивает так называемое точное позиционное обслуживание. В целях ограничения доступа к Y-коду не санкционированным потребителям США могут внести в Y-код элемент шифрования, получивший название *antispoofing*. Код C/A предназначен для использования невоенными потребителями и обеспечивает так называемое стандартное обслуживание по определению местоположения (SPS). По сравнению с Y-кодом C/A-код характеризуется меньшей точностью и устойчивостью к воздействию активных преднамеренных радиопомех. Кроме того, захватить этот сигнал легче, и поэтому военные приемники вначале отслеживают C/A-код, а затем переходят на Y-код. Военные органы США могут понизить точность C/A-кода, используя для этого так называемый метод селективного доступа (*Selective Availability SA*). Таким образом, SA позволяет контролировать уровень точности, предоставляемый всем пользователям стандартным обслуживанием по определению местоположения.

Для нахождения трехмерных координат местоположения пользователя ( $X, Y, Z$ ), определяющих широту, долготу и высоту с учетом погрешности измерения времени (четвертая неизвестная величина), требуется решить систему из четырех уравнений. Поэтому на приемную станцию должны поступать сигналы как минимум от четырех ИСЗ. При вычислении же планарных (плоскостных) координат достаточно сигналов от трех спутников. Скорость определяется по доплеровскому сдвигу несущей частоты сигнала ИСЗ, вызываемому движением пользователя. Доплеровский сдвиг замеряется при сопоставлении частот сигналов — принимаемого от спутника и генерируемого в приемной станции. Сигналы, несущие навигационную информацию, излучаются на двух частотах: 1575,42 МГц (L1) и 1227,6 МГц (L2). На второй излучаются только сигналы с военным кодом P (Y), несущим высокоточную информацию (P — *Precision*, точный) и защищенным криптографическим методом от имитации

онных помех, о чем свидетельствует индекс  $Y$ . На первой частоте передаются сигналы как с кодом  $P(Y)$ , так и с общедоступным кодом  $C/A$  (Coarse Acquisition — грубый захват), т.е. в СРНС NAVSTAR используется кодовое разделение сигналов.

Прием сигналов с кодом  $P(Y)$  дает возможность работы в режиме высокой точности измерений (PPS — Precise Positioning Service), а сравнение времени прихода сигналов на частотах  $L1$  и  $L2$  позволяет вычислять дополнительную задержку, возникающую при прохождении через ионосферу из-за нелинейности (увеличения пути) распространения в ней радиоволн. Определение времени прохождения радиоволнами участка "спутник — Земля" при их прямолинейном распространении значительно повышает точность измерений навигационных данных.

Прием сигналов с кодом  $C/A$  только на одной частоте не дает возможности вычислять ошибки, вносимые при прохождении радиоволн через ионосферу. Кроме того, сама структура кода обеспечивает значительно худшие характеристики в режиме стандартной точности измерений (SPS — Standart Positioning Service). Так, если в режиме PPS с вероятностью 0,95 ошибки измерения планарных координат не превышают 22 м, высоты — 27,7 м и времени — 0,09 мкс, то в SPS они увеличиваются соответственно до 100 м, 140 м и 0,34 мкс, соответственно. Вероятная круговая ошибка (ВКО) определения планарных координат в PPS составляет не более 8 м, а в SPS — не более 40 м (предполагается, что сигналы поступают от четырех НИСЗ с благоприятным геометрическим расположением относительно потребителя). Ошибка измерений в режиме SPS может быть доведена до 300 м и более. Преднамеренное ухудшение точности путем ввода ошибок при формировании навигационных данных в период обострения обстановки в мире (режим избирательного доступа — Selective Availability) не вызывает каких-либо проблем у военных пользователей США и их союзников. Дело в том, что наличие режима SPS определялось необходимостью грубого определения военными пользователями РНС NAVSTAR своего местоположения для вхождения в код  $P(Y)$ . В настоящее время уровень развития на-

вигационных средств в большинстве случаев позволяет осуществлять достаточно быстрый захват P (Y) без применения кода C/A, поэтому значительная часть военных приемных станций такого режима не имеет вообще.

Сигналы с обоими кодами — P (Y) и C/A — несут навигационную информацию, передаваемую со скоростью 50 бит/с. Сообщения передаются по кадрам, каждый из которых содержит 1500 бит информации, то есть длительность его равна 30 с. Кадр подразделяется на пять субкадров, однако субкадры № 4 и №5 повторяются по 25 раз, поэтому для передачи полного сообщения требуется 25 кадров, что занимает 12,5 мин. Следует, однако, иметь в виду, что для измерения текущей псевдодальности и получения поправок времени бортового времязадающего устройства получения всего объема информации не требуется. К тому же субкадры №№ 1, 2 и 3 повторяют во всех кадрах специфическую для каждого ИСЗ информацию: № 1 несет сообщение об уходе бортового стандарта частоты, по которому определяется работоспособность спутника, № 2 и № 3 представляют высокоточные данные о реальных параметрах его орбиты. Они необходимы для захвата кода и поэтому повторяются каждые 30 с. Это время является стандартным для первоначального определения пользователем своего местоположения.

Основная навигационная информация включает время системы NAVSTAR в момент излучения сигнала и коэффициент коррекции запаздывания сигнала при искривлении его пути на ионосферном участке (расчетное, а не реальное значение). Сигналы обоих кодов представляют собой псевдошумовую последовательность импульсов, с помощью которых осуществляется фазовая манипуляция несущей частоты. При этом в случае передачи сигналов с кодами P (Y) и C/A на одной несущей частоте фазы передаваемых сообщений сдвигаются на  $90^\circ$ . В результате псевдошумовой манипуляции ширина полосы сигнала, несущего информацию, увеличивается со 100 Гц (удвоенная частота навигационных посылок 50 Гц) до 20,46 МГц (код P) или до 2,046 МГц (код C / A). Обеспечиваемая спутниками "Block 2A и 2R" величина сигнала у поверхности Земли составляет 160дБВ, а для кода C/A достигает 163дБВ. В результате уровень

сигнала у приемной антенны пользователя ниже уровня шумов приемных станций и его выделение осуществляется за счет накопления и сжатия.

Военный код P (Y), имеющий продолжительность 267 суток, состоит из самостоятельных элементов, которые делятся примерно по 7 суток. Каждый НИСЗ использует свой элемент кода, что позволяет осуществлять их распознавание. Код C/A — общедоступный из-за простоты, обусловленной малой продолжительностью, может применяться как в военных, так и в гражданских приемных устройствах. Вся навигационная информация передается посылкой длительностью 1 мс, содержащей 1023 бит.

### 3. СПУТНИКОВАЯ РАДИОНАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА ГЛОНАСС

Орбитальная группировка СРНС ГЛОНАСС, как и GPS, состоит из 24 НИСЗ. В ГЛОНАСС спутники расположены на трех круговых орбитах с наклоном  $64,8^\circ$  (по 8 на каждой). Долготы восходящих узлов трех орбитальных плоскостей номинально различаются на  $120^\circ$ . Период обращения каждого НИСЗ равен 11 ч 15 мин 44 с, высота орбиты 19100 км над поверхностью Земли. Несинхронные орбиты НИСЗ в ГЛОНАСС более стабильны по сравнению с синхронными орбитами в GPS. Это объясняется следующим образом. Синхронная орбита имеет двухвитковый след на поверхности земли и возмущения орбит отдельных НИСЗ, обусловленные нецентральностью поля тяготения Земли, будут заметно отличаться. Несинхронная орбита имеет многовитковый след на поверхности Земли и возмущения орбит для всех НИСЗ орбитальной группировки будут практически одинаковы.

В ГЛОНАСС каждый НИСЗ излучает сигналы в двух диапазонах 1600 и 1200 МГц. Кроме того, в ГЛОНАСС используется частотное разделение сигналов НИСЗ. Номиналы частот нижнего и верхнего диапазонов в ГЛОНАСС задаются выражениями

$$f_{\text{НК}} = f_{\text{НО}} + k\Delta f_{\text{Н}};$$

$$f_{\text{БК}} = f_{\text{БО}} + k\Delta f_{\text{В}},$$

где  $f_{HO} = 1246$  МГц;  $f_{BO} = 1602$  МГц;  $\Delta f_H = 0,4375$  МГц;  $\Delta f_B = 0,5625$  МГц; при этом отношение нижней и верхней частоте равно  $7/9$ .

До 1998 года в ГЛОНАСС использовались следующие номера несущих частот  $k=1..15, 21..24$ . С 1998 по 2005 гг. номера частот располагались в диапазоне  $k= 1..12$ . С 2005 года осуществлен переход на номера частот  $k= 7..4$ . Уменьшение числа рабочих частот объясняется тем, что спутники-антиподы (в смысле размещения НИСЗ на орбитальной плоскости) в ГЛОНАСС могут иметь одинаковые частоты. Действительно, для околоземных и наземных потребителей такие НИСЗ никогда не будут видны одновременно, а для космических потребителей сигналы от них будут приходить с разных направлений.

Как и в GPS, радиосигналы верхнего диапазона частот НИСЗ ГЛОНАСС состоят из двух сдвинутых на  $\pi/2$  фазоманипулированных сигналов открытого дальномерного сигнала и дальномерного сигнала высокой точности, доступного ограниченному кругу потребителей. Узкополосный сигнал открытого дальномерного кода модулируется также служебной навигационной информацией. В настоящее время сигналы нижнего диапазона предназначены только для передачи высокоточного кода, однако, перспективные НИСЗ ГЛОНАСС-М в нижнем диапазоне частот будут излучать и сигналы открытого дальномерного кода, что позволит всем категориям пользователей осуществлять ионосферную коррекцию.

Служебная информация накладывается на узкополосный дальномерный сигнал путем инвертирования открытого дальномерного кода. Длина строки служебной информации равна 2 с: первые 0,3 с предназначены для метки времени, остальные 1,7с предназначены для передачи 85 двоичных символов. Полный кадр навигационной информации состоит из 15 строк (30 с) Пять кадров навигационной информации объединяются в суперкадр. В составе каждого кадра передается полный объем цифровой информации, относящейся к данному НИСЗ и часть альманаха системы ГЛОНАСС. Альманах системы полностью передается одним суперкадром.

Оперативная информация кадра по каждому навигационному спутнику содержит:

- признак достоверности информации в кадре;
- время начала кадра;
- эфемеридную информацию — координаты и скорости НИСЗ в Гринвичской прямоугольной системе координат на момент времени  $t_0$ ;
- частотно-временные поправки на момент времени  $t_0$  в виде относительной поправки к несущей частоте НИСЗ и поправки к шкале времени НИСЗ;
- время  $t_0$  (кратно 30 мин от начала суток), к которому привязана эфемеридная информация и частотно-временные поправки.

Альманах системы содержит:

- время, к которому относится альманах;
- параметры орбиты, номер пары несущих частот и поправку к шкале времени для каждого НИСЗ;
- поправку к шкале времени системы ГЛОНАСС относительно шкалы времени страны (единой системы времени).

Таким образом, кратко рассмотрев основы СРНС, можно приступить к более подробному рассмотрению аппаратуры пользователя (АП).

#### 4. ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА АП ССРНС

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 безусловным, а определяется спецификой ее 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, как, например, в ранцевом варианте АП. 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.

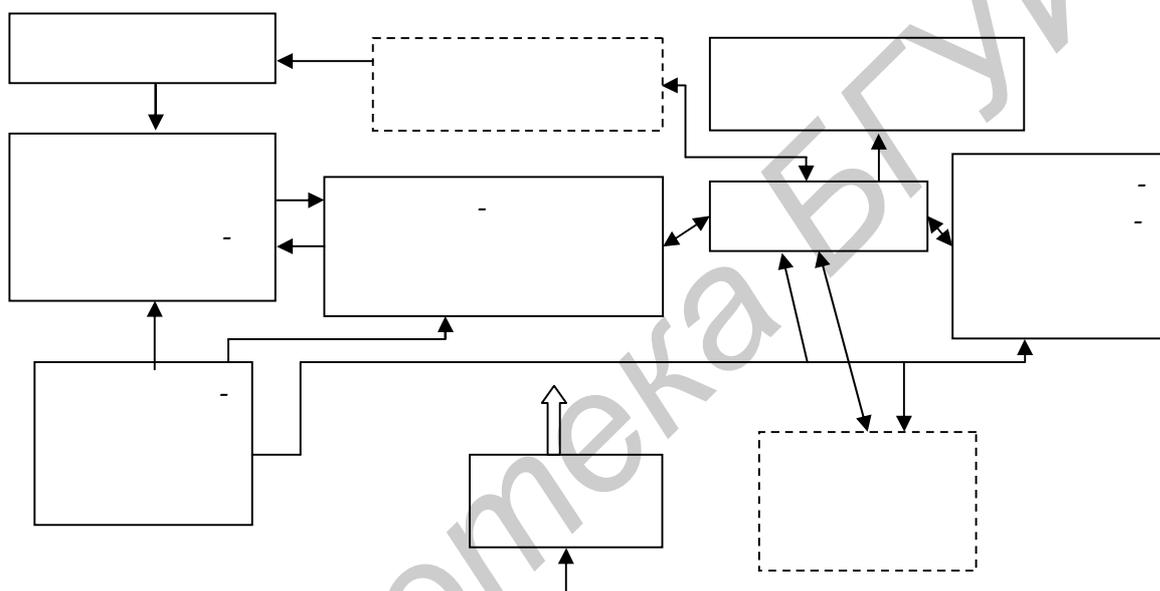


Рис. 1. Обобщенная структурная схема АП

Рассмотрим кратко 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 ССРНС, 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. Если

использование фазированных антенных решеток (ФАР) для слабонаправленных антенн с изменяемой конфигурацией диаграммы направленности в настоящее время доведено до опытных образцов в АП системы «Навстар», то применение ФАР для антенн с узкими управляемыми лучами встретило ряд технических трудностей, которые в настоящее время ещё не определены.

Поскольку в ССРНС «Глонасс» и «Навстар» используются так называемые «энергетически скрытые» сигналы (т. е. сигналы с очень малым уровнем мощности излучения), радиочастотные усилители АП должны обладать очень высокой чувствительностью. Достаточно сказать, что 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.

Аналого-цифровой процессор первичной обработки решает задачи: поиска фаз (т. е. задержек) манипулирующих псевдослучайных последовательностей (ПСП); слежения за задержкой ПСП; слежения за фазой и частотой несущих 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 встраиваемых в АП цифровых процессорах.

К задачам, решаемым навигационным процессором, относятся: выбор рабочего созвездия НИСЗ из числа видимых; расчет данных целеуказания по частоте несущей и задержке манипулирующей ПСП; декодирование навигацион-

ных 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.

Следует отметить, что в зависимости от типа АП навигационный процессор, реализуемый на микропроцессорах и микро-ЭВМ, может быть построен как по однопроцессорной, так и по многопроцессорной структуре и может 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 (ППМ), 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 целеуказаний. В этом случае на поиск сигнала первого НИСЗ и на прием альманаха могут потребоваться десятки минут. Имеющийся в АП альманах обновляется автоматически при приеме сигналов по достижении им определенного «возраста», порядка нескольких дней, но, как правило, не более одного месяца.

Априорные данные о координатах объекта и текущем времени вводятся либо оператором с пульта управления и индикации, либо автоматически от автономных средств навигации объекта. Причем применение в АП гостированных каналов цифрового обмена позволяет использовать данные практически от всей номенклатуры автономных средств, устанавливаемых в настоящее время на подвижных объектах, включая инерциальные навигационные системы, измерители скорости, датчики крена, барометрические высотомеры, системы воздушных сигналов, датчики пройденного пути, лаги и т. д.

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

## **5. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПОТОКИ В АП**

Работа АП в реальном масштабе времени характеризуется чрезвычайной насыщенностью обмена потоками информации между основными блоками структурной схемы АП. 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 радиальной квазискорости, и выделенные биты и слова служебного информационного сообщения, содержащегося 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 («размножение») эфемерид НИСЗ, выбор рабочих созвездий НИСЗ, 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. Номенклатура циркулирующих потоков информации в АП иллюстрируется рис. 2.

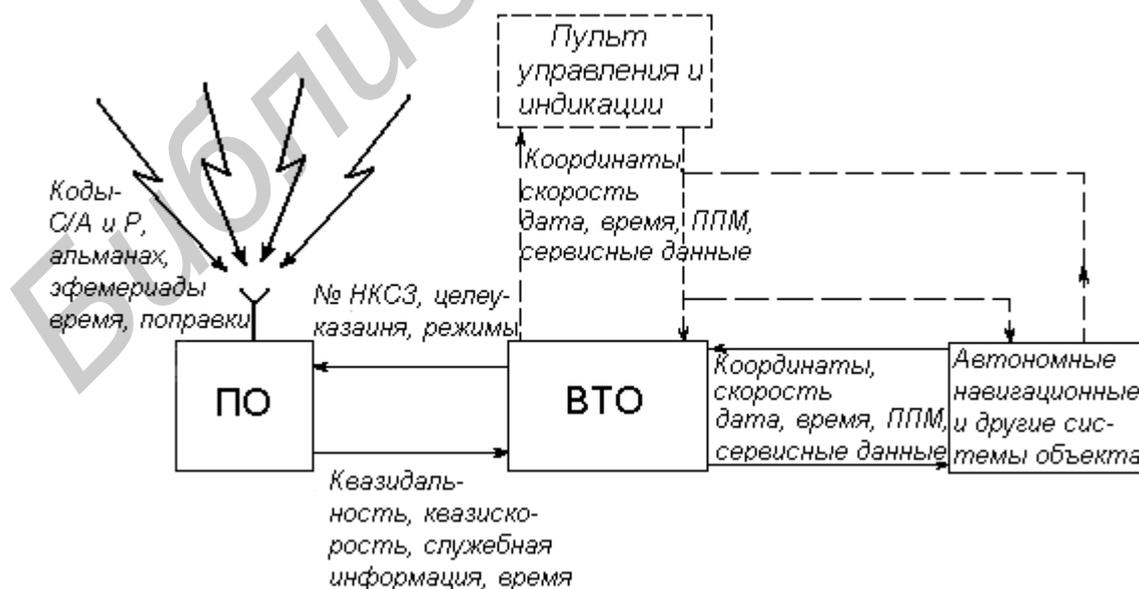


Рис. 2. Информационные потоки в бортовой АП

От НИСЗ с помощью радиосигнала в ПО поступает входная информация в виде кодовых последовательностей (в АП системы «Навстар» коды / 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.

После обработки принятой информации путем решения соответствующих задач выходная информация ВТО выдается на пульт индикации и в системы объекта, являющиеся непосредственными потребителями информации АП. Так, на самолете это пилотажно-навигационный комплекс, в котором по данным АП ССРНС производится коррекция автономных навигационных систем, в частности инерциальных. Информация, воспроизводимая на пульте управления и индикации, анализируется и используется штурманом.

Состав выдаваемой из АП информации может представлять широкую номенклатуру данных и определяется конкретным типом объекта. Так, для гражданской самолетной АП типовым набором выходных данных считается: дата и текущее время, плановые географические координаты (широта и долгота), ортодромические координаты, составляющие вектора скорости в плане и по вы-

соте, путевая скорость и путевой угол, дальность до очередного ППМ, время прибытия в очередной ППМ, оставшееся время полета.

## 6. ИЗМЕРЯЕМЫЕ РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Основные радионавигационные параметры, определяемые в СРНС, – дальность и радиальная скорость.

Соответствующими им радионавигационными параметрами (параметрами радиосигнала) служат задержка  $\tau$  сигнала и доплеровское смещение частоты  $f$ . Так как главным требованием, предъявляемым к СРНС, является высокая точность измерения навигационных параметров, то и основным требованием, предъявляемым к радиосигналам, также будет высокая точность измерения задержки  $\tau$  сигнала и доплеровского смещения частоты  $f$ .

Для повышения точности измерения задержки необходимо расширять спектр сигнала, а для повышения точности измерения доплеровского сдвига частоты следует увеличивать длительность сигнала (что является противоречивым для простых сигналов). Поэтому в СРНС для получения высокой точности измерения радионавигационных параметров целесообразно использовать сигналы с большой базой  $B \gg \lambda$ . Такие сигналы называют шумоподобными сигналами (ШПС) или сложными.

ШПС получают в результате дополнительной модуляции радиосигнала. Различают ШПС: частотно-модулированные, многочастотные, фазоманипулированные, дискретные частотные, частотно-манипулированные, дискретные составные частотные. В современных СРНС используют фазоманипулированные сигналы. Хорошая разрешающая способность ШПС основана на том, что они имеют корреляционные функции с узкими пиками по осям  $\tau$  и  $f$ , ширина которых обратно пропорциональна  $f$ . (рис.3).

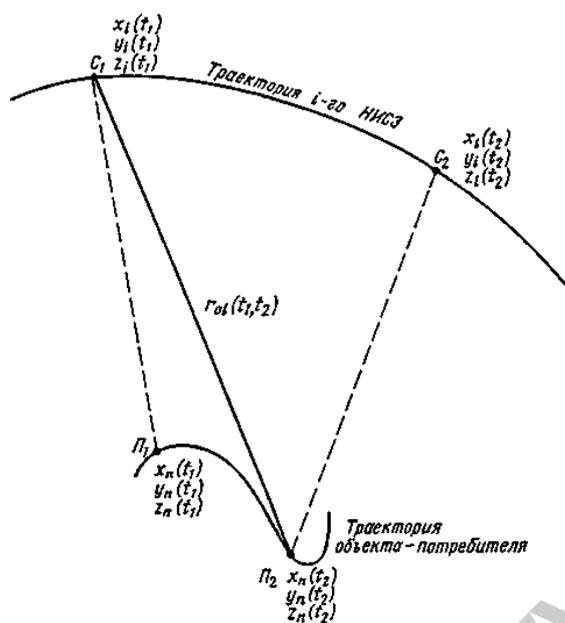


Рис. 3. Взаимное расположение НИСЗ (точка С) и потребителя (точка П)

## 7. ВИДЫ И МОДЕЛИ ПОМЕХ

Радиосигналы от НИСЗ, принимаемые АП, всегда в той или иной степени искажаются под воздействием аддитивных и неаддитивных помех. Применительно к АП многообразие аддитивных помех в довольно общем случае можно представить в виде следующих компонент:

$n(t)$  – широкополосная флуктуационная помеха,

$(t)$  – хаотическая импульсная помеха, обусловленная действием, например, соседних импульсных систем,

$u(t)$  – узкополосная флуктуационная помеха, учитывающая, в частности, влияние излучения непрерывных систем.

### 7.1. Математические модели хаотических импульсных помех

Хаотические импульсные помехи характерны, в частности, для асинхронных адресных систем связи, где они обусловлены неортогональностью используемых сигналов в системе. Процесс  $(t)$ , определяющий хаотическую импульсную помеху, в некоторых случаях можно представить в виде

$$\eta(t) = \eta n(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi n),$$

где  $\eta(t)$  – случайная последовательность помеховых видеоимпульсов;  
 $n$  – случайная фаза помехового сигнала.

Случайную последовательность помеховых видеоимпульсов  $n(t)$  часто аппроксимируют дискретным марковским процессом, принимающим случайным образом одно из двух значений:  $V$  или  $0$ , где  $V = \text{const}$  – амплитуда помехи. Считаем, что процесс  $n(t)$  не зависит от флуктуационной помехи  $n(t)$  и полезного сигнала  $s(t)$ .

Вероятности состояний  $p_1 = (n = V)$  и  $p_2 = (n = 0)$  дискретного процесса  $n(t)$  удовлетворяют уравнениям Колмогорова

$$\dot{p}_j = \sum_{i=1}^2 a_{ij}(t) \cdot p_i(t), \quad j = 1, 2, \quad \sum_{j=1}^2 a_{ij} = 0,$$

где коэффициенты  $a_{ij}(t)$  представляют собой интенсивности переходов, определяемые локальными значениями вероятностей перехода (коэффициенты  $a_{ij}(t)$  считаются известными).

## 7.2. Математическая модель узкополосной флуктуационной помехи

Радиотехнические системы передачи информации часто функционируют в условиях действия (помимо широкополосных флуктуационных) узкополосных помех. Такие помехи создаются, например, системами с непрерывными сигналами. Кроме того, в ряде случаев узкополосной помехой могут являться шумы и сигналы других источников излучения, прошедшие через активные ретрансляторы.

В качестве модели узкополосной помехи  $u(t)$  принимаем нормальный белый шум, пропущенный через колебательный контур:

$$u' = u1 \quad u1' = -2 \cdot \gamma_u \cdot u1 - \omega_n^2 \cdot u + \omega_n^2 \cdot n_u(t),$$

где  $n_u(t)$  – формирующий белый шум.

Параметры  $\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$  и  $\gamma_u = \frac{R}{2 \cdot L}$  определяют резонансную частоту и затухание формирующего колебательного контура;  $R$ ,  $L$  и  $C$  – его сопротивление, индуктивность и емкость соответственно.

### 7.3. Математическая модель широкополосной флуктуационной помехи

Широкополосная флуктуационная помеха  $n(t)$  учитывает наличие собственных шумов приемника, космических шумов, радиоизлучений Земли и т. п. В нашем рассмотрении помеха  $n(t)$  представляется стационарным гауссовским белым шумом со следующими характеристиками, которые считаются известными:

$$M [n(t)] = 0;$$

$$M [n(t_1)n(t_2)] = \frac{1}{2} N_0 \cdot \delta \cdot (t_2 - t_1)$$

$$N_0 = \text{const.}$$

### 7.4. Математические модели неаддитивных амплитудных помех

Неаддитивные помехи в общем случае приводят к амплитудным, фазовым и временным искажениям полезных сигналов радиотехнических систем. При рассмотрении полагаем, что неаддитивные помехи являются компонентами многомерных процессов Маркова.

Такое предположение представляется физически оправданным, так как реальные случайные процессы можно с требуемой точностью аппроксимировать многомерными марковскими процессами.

В зависимости от типа радиотехнической системы передачи информации, области ее применения и условий функционирования при учете амплитудных замираний сигналов нередко применяют одну из двух моделей: гауссовскую и релеевскую.

При использовании гауссовской модели амплитудных замираний обычно считают, что в результате действия мультипликативной помехи амплитуда полезных сигналов  $A(t)$  флуктуирует согласно равенству:

$$A(t) = A_0 \cdot [1 + m_A \cdot \lambda_A(t)],$$

где  $A_0 = M[A(t)]$ ;  $m_A$  – постоянный коэффициент;  $\lambda_A(t)$  – случайная функция, определяющая помеху  $A(t)$ .

При использовании релеевской модели амплитудных замираний считают, что в результате действия мультипликативной помехи амплитуда полезных сигналов  $A(t)$  флуктуирует согласно равенству

$$A'(t) = -\mu_A \cdot A(t) + \frac{N_A}{4 \cdot A(t)} + n_A(t),$$
$$\mu_A = \text{const.}$$

## 8. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Перед тем, как приступить к выполнению лабораторной работы, необходимо:

1. Изучить принципы действия СРНС.
2. Рассмотреть структурную схему аппаратуры потребителей (АП) СРНС.
3. Изучить информационные потоки в АП.
4. Изучить измеряемые радионавигационные параметры.
5. Рассмотреть основные виды и модели помех.

В ходе данной лабораторной работы в начале кратко рассматриваются основы спутниковой радионавигации, а затем более подробно – аппаратура потребителей спутниковых радионавигационных систем. По окончании изучения теории каждого пункта студентам предлагается несколько тестов. Тест можно пройти более одного раза, но после первого прохождения (а также во время него) доступ к теории по данной теме (пункту) закрывается, так что необходимо внимательно изучать теоретические сведения.

После запуска программы студенту необходимо ввести свою фамилию и номер группы в соответствующие поля и нажать кнопку «**Приступить к выполнению**». После изучения теоретического необходимо приступить к выполнению

теста, для чего на вкладке Тест №N необходимо нажать кнопку «Начать тест». Результат прохождения теста можно посмотреть на вкладке «Результаты».

Выход из программы осуществляется только с разрешения преподавателя.

## 9. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Титульный лист.
2. Список вопросов, указанных в лабораторной работе, с ответами, полученными в результате выполнения лабораторной работы.
3. Анализ результатов и выводы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. – М.: ЭКО-Трендз, 2000.
2. Шабров О.В. Спутниковые системы радионавигации. – Мн.: БГУИР, 2000.
3. Сетевые спутниковые радионавигационные системы/В.С.Шебшаевич и др.; Под ред. И.С.Шебшаевича. – 2-е изд. – М.: Радио и связь, 1993.
4. Боккер П. ISDN. Цифровая сеть с интеграциями служб. Понятия, методы, системы: Пер. с нем. – М.: Радио и связь, 1991.
5. Титтель Э., Джеймс С., Пискителло Д., Пфайфер Л. ISDN. Просто и доступно. – М.: Изд-во Лорд, 1999.
6. Росляков А.В. Цифровые системы коммутации. – М.: ОКО-Трендз, 1999.
7. Росляков А.В.. Общеканальная система сигнализации N7. – М.: ОКО-Трендз, 1999.
8. Гольдштейн Б.С. Сигнализации в сетях связи. – М.: Радио и связь, 1999.
9. Гольдштейн Б.С. Протоколы сети доступа. – М.: Радио и связь, 1999.
10. Лихтциндер Б.Я., Кузякин М.А., Росляков А.В., Фомичев С.М. Интеллектуальные сети связи. – М.: ЭКО-Трендз, 2000.
11. Крестьянинов С.В., Полканов Е.И., Шнепс-Шнеппе М.А. Интеллектуальные сети и компьютерная телефония. – М.: Радио и связь, 2001.
12. Кульгин М.Ю. Технология корпоративных сетей. Энциклопедия. – СПб, 2000.

13. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. – СПб, 2000.
14. Назаров А.Н., Симонов М.В. АТМ технология и практика измерений. – М.: ОКО-Трендз, 1999.
15. Бакланов И.Г. ISDN FRAME RELAY: технология и практика измерений. – М.: ОКО-Трендз, 1999.
16. Якубайтис Э.А. Открытые информационные сети. – М.: Радио и связь, 1991.
17. Бакланов И.Г. Технология измерений в первичной сети. Ч. 1 и 2. – М.: ОКО-Трендз, 1999.
18. Бакланов И.Г. Методы измерений в системах связи. – М.: ОКО-Трендз, 1999.
19. Саммерс Ч., Дюнц Б. Высокоскоростное цифровое соединение с сетью ИНТЕРНЕТ. – М.: Радио и связь, 1998.
20. Чуров Е.П. Спутниковые системы радионавигации. – М.: Сов. радио, 1977.
21. Алишев Я.В. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей. Ч.2.: Волоконно-оптические интегральные и интеллектуальные сети связи: Учебное пособие. – Мн.: БГУИР, 1996.
22. Безир Х., Хойнер П., Кетлер Г. Цифровая коммутация: Пер. с нем. – М.: Радио и связь, 1984.
23. Лутов М.Ф., Жарков М.А., Юнаков П.А. Квазиэлектронные и электронные АТС. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1988.
24. Бологов И.Ф., Гуан Т.И. Электронно-цифровые системы коммутации: Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1985.
25. Беллами Дж. Цифровая телефония: Пер.с англ. – М.: Радио и связь, 1986.

Учебное издание

**АППАРАТУРА ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СПУТНИКОВЫХ  
РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
к лабораторной работе

по дисциплине «Сетевые технологии и сигнализация в телекоммуникациях»  
для студентов специальности  
I-45 01 03 «Сети телекоммуникаций»  
всех форм обучения

Составители:

**Астровский Иван Иванович**  
**Земляков Алексей Леонидович**

Ответственный за выпуск И.И. Астровский

Подписано в печать 06.06.2006.	Формат 60x84 1/16	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 1,74.
Уч.-изд. л. 1,2.	Тираж 100 экз.	Заказ 229.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.  
220013, Минск, П.Бровки, 6