

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

Кафедра сетей и устройств телекоммуникаций

## **ПРИЕМНИКИ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Методические указания к лабораторной работе  
по курсу «Сетевые технологии и сигнализация в телекоммуникациях»  
для студентов специальности 1-45 01 03 «Сети телекоммуникаций»  
всех форм обучения

Минск БГУИР 2009

УДК 629.783:527(076.5)

ББК 39.66я73

П75

С о с т а в и т е л ь:

И. И. Астровский

П75

**Приемники** спутниковых радионавигационных систем : метод. указания к лаб. работе по курсу «Сетевые технологии и сигнализация в телекоммуникациях» для студ. спец. 1-45 01 03 «Сети телекоммуникаций» всех форм обуч. / сост. И. И. Астровский. – Минск : БГУИР, 2009. – 22 с. : ил.

Рассматриваются принципы построения, основные параметры и характеристики приемников спутниковых радионавигационных систем.

Приведены методические указания, порядок выполнения и контрольные вопросы к лабораторной работе.

Лабораторная работа выполняется 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. В процессе выполнения лабораторной работы пользователь может получать помощь и пояснения.

**УДК 629.783:527(076.5)**

**ББК 39.66я73**

© Астровский И. И., составление, 2009

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2009

## СОДЕРЖАНИЕ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ.....	4
2 ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....	4
2.1 Историческая справка.....	4
2.2 Система местоопределения, использующая специализированную спутниковую радионавигационную систему.....	6
2.3 Система местоопределения, использующая геостационарные спутники связи.....	8
2.4 Глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС).....	10
2.5 Система глобального позиционирования (GPS).....	12
2.6 Спутниковая система навигации Галилео (Galileo).....	12
2.7 Приемники спутниковых навигационных систем.....	13
2.7.1 Обобщенная структурная схема аппаратуры потребителей СРНС.....	13
2.7.2 Комбинированный приемник ГЛОНАСС/GPS.....	16
3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	21
ЛИТЕРАТУРА.....	21

## 1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить принципы построения, основные параметры и характеристики приемников спутниковых радионавигационных систем, а также области их применения.

## 2 ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Исторически развитие космических систем связи и навигации началось параллельно. Хотя в навигационных системах присутствовали служебные комплексы связи, они не являлись системами связи массового обслуживания и обеспечивали жизнедеятельность системы. В то же время на системы космической связи в начале их развития не возлагались функции измерения координат, хотя они нуждались в баллистическом обеспечении и, следовательно, в решении задачи определения местоположения ретрансляторов. То есть решение задач местоопределения в системах связи носило характер обеспечения их функционирования.

Однако довольно быстро стало ясно, что для решения задачи управления и связи с подвижными объектами необходимо знание координат объектов. Возможность совмещения услуг местоопределения и связи нашла применение в обслуживании транспортных сухопутных перевозок, породив целое направление – телематику. Одновременно возможность измерения и передачи координат подвижных объектов позволяла создавать системы нового класса – системы глобального аварийного оповещения.

С технической точки зрения созданные радиосистемы местоопределения ГЛОНАСС и GPS являются уникальными научно-техническими комплексами, обеспечивающими в настоящее время наибольшую точность глобальной временной и координатной привязки абонентов. Однако это стало возможным благодаря применению в бортовых радиотехнических комплексах искусственных спутников Земли (ИСЗ) наиболее передовых достижений.

### 2.1 Историческая справка

Развитие спутниковой радионавигационной системы (СРНС) ГЛОНАСС, как чаще всего считают, положено запуском 4 октября 1957 г. в Советском Союзе первого в истории человечества искусственного спутника Земли (ИСЗ) [1].

Научные основы низкоорбитальных СРНС были развиты в процессе выполнения исследований по теме «Спутник» (1958 – 1959 гг.). Проведенные работы позволили перейти в 1963 г. к опытно-конструкторским работам над первой отечественной низкоорбитальной системой, получившей в дальнейшем название «Цикада».

В 1979 г. была сдана в эксплуатацию навигационная система 1-го поколения «Цикада» в составе четырех навигационных спутников (НС), выведенных на круговые орбиты высотой 1000 км, наклоном  $83^\circ$  и равномерным

распределением плоскостей орбит вдоль экватора. Она позволяет потребителю в среднем через каждые полтора-два часа входить в радиоконтакт с одним из НС и определять плановые координаты своего места при продолжительности навигационного сеанса до 5–6 мин.

Наряду с совершенствованием бортовых систем спутника и корабельной приемоиндикаторной аппаратуры разработчики системы серьезное внимание уделили вопросам повышения точности определения и прогнозирования параметров орбит навигационных спутников. Была отработана специальная схема проведения измерений параметров орбит средствами наземно-комплексного управления, разработаны методики прогнозирования.

Для оснащения широкого класса морских потребителей разработаны и серийно изготавливаются комплекты приемоиндикаторной аппаратуры «Шхуна» и «Челн». В дальнейшем спутники системы «Цикада» были дооборудованы приемной измерительной аппаратурой обнаружения терпящих бедствие объектов, которые оснащены специальными радиобуями, излучающими сигналы бедствия на частотах 121 и 406 МГц. Эти сигналы принимаются спутниками системы «Цикада» и ретранслируются на специальные наземные станции, где производится вычисление точных координат аварийных объектов (судов, самолетов и др.).

Дооснащенные аппаратурой обнаружения терпящих бедствие спутники «Цикада» образуют системы «Коспас». Совместно с американо-франко-канадской системой «Сарсат» они образуют единую службу поиска и спасения, на счету которой уже несколько тысяч спасенных жизней [1].

Успешная эксплуатация низкоорбитальных спутниковых навигационных систем морскими потребителями привлекла широкое внимание к спутниковой навигации. Возникла необходимость создания универсальной навигационной системы, удовлетворяющей требованиям всех потенциальных потребителей: авиации, морского флота, наземных транспортных средств и космических кораблей.

В 1995 г. было завершено развертывание СРНС ГЛОНАСС до ее штатного состава (24 НС). В настоящее время прилагаются большие усилия по поддержанию группировки. Разработаны наземная аппаратура АСН-15, самолетная аппаратура АСН-16, СНС-85, АСН-21, морская аппаратура «Шкипер» и «Репер» и др. [1].

В США также проводились интенсивные разработки СРНС. В 1958 г. в рамках создания первого поколения атомных ракетных подводных лодок «Полярис» была создана система «Транзит» (аналог СРНС «Цикада»), введенная в строй в 1964 г.

В начале 70-х гг. начаты работы по созданию СРНС второго поколения «Навстар» (аналога системы ГЛОНАСС). Спутниковая радионавигационная система GPS полностью развернута в 1993 г.

Спутниковые системы местоопределения подвижных объектов базируются на использовании радиолиний, обеспечивающих передачу сигналов между подвижным объектом, искусственным спутником Земли и наземной станци-

ей. При этом подвижный объект, ИСЗ и наземная станция оснащаются радиотехническим оборудованием в зависимости от используемой конфигурации системы и метода определения координат объекта.

## 2.2 Система местоопределения, использующая специализированную спутниковую радионавигационную систему

Спутниковой радионавигационной системой принято называть систему, в которой группировка ИСЗ выполняет роль опорных радионавигационных точек. К числу таких систем относятся «Навстар» (США) и ГЛОНАСС (Россия).

Эти системы относятся к категории пассивных систем с самоопределением. В них радиопередатчик имеется только на навигационных ИСЗ, а аппаратура, размещаемая на подвижном объекте, имеет только приемник сигналов ИСЗ, устройство обработки сигналов и вычисления координат объекта. В данных навигационных системах результаты вычисления координат объекта имеются только на самом объекте, т. е. аппаратура объекта сама определяет свои координаты. Общепринятое название этой аппаратуры – аппаратура потребителя спутниковой навигации (АПСН) [2].

Схема построения системы радиоместоопределения и сопровождения подвижных объектов на основе спутниковой радионавигационной системы представлена на рисунке 1.

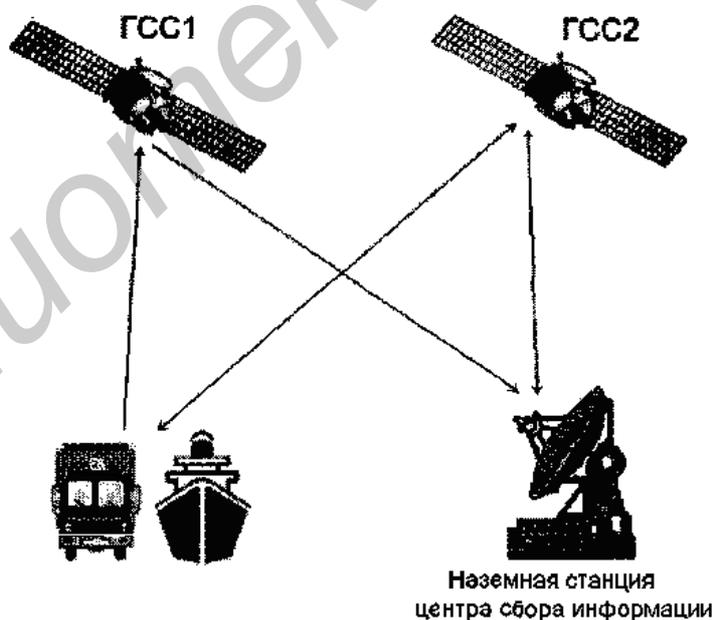


Рисунок 1 – Схема построения системы радиоместоопределения

Аппаратура, устанавливаемая на подвижном объекте – аппаратура потребителя, осуществляет прием на направленную антенну навигационных сигналов одновременно от нескольких ИСЗ (не менее четырех), находящихся в зоне видимости. По поступающей от ИСЗ кодовой информации о параметрах

излучаемого со спутника сигнала, а также данных об орбитальных параметрах движения ИСЗ (эфемеридная информация) в ЭВМ аппаратуры потребителя по заложенным алгоритмам определяются географические координаты подвижного объекта, скорость и направление движения.

Данные о координатах и скорости подвижного объекта могут представляться потребителю в визуальной форме на табло и запоминаются с регистрацией времени измерения.

Для передачи навигационных параметров подвижного объекта в центр сбора данных на подвижном объекте используется отдельный канал связи подвижной спутниковой службы (ПСС). В данной схеме указан канал спутниковой связи подвижного объекта с наземной станцией центра сбора через геостационарный спутник связи (ГСС). Сеанс измерения навигационных параметров и их передача от подвижного объекта включается по запросу из центра сбора. При этом не требуется вмешательства оператора на подвижном объекте.

Глобальная спутниковая радионавигационная система NAVSTAR (NAVigation System using Timing And Ranging) или GPS (Global Positioning System) создана для высокоточного навигационно-временного обеспечения объектов, движущихся в космосе, воздухе, на земле и в воде [2].

В ее состав входят навигационные спутники, наземный комплекс управления и аппаратура потребителей (пользователей). Применяемый в системе принцип определения координат состоит в том, что специальные приемники, установленные у потребителей, измеряют дальности до нескольких спутников и определяют свои координаты по точкам пересечения поверхностей равного удаления. Величина временной задержки определяется сопоставлением кодов сигналов, излучаемых спутником и генерируемых приемным устройством, методом временного сдвига до их совпадения. Временной сдвиг определяется по часам приемника. Для нахождения широты, долготы, высоты и для исключения ошибок в определении временного сдвига приемник пользователя должен принимать навигационные сигналы от четырех спутников.

Скорость определяется по доплеровскому сдвигу несущей частоты сигнала спутника, вызываемому движением пользователя. Эффект Доплера (по имени австрийского физика К. Доплера) состоит в изменении регистрируемой приемником частоты колебаний или длины волны при относительном движении приемника и источника этих колебаний. Доплеровский сдвиг замеряется при сопоставлении частот сигналов, принимаемых от спутника и генерируемых приемником.

Навигационные сигналы излучаются на двух частотах  $L$ -диапазона ( $L$ -band, полосы радиочастот от 390 до 1550 МГц); 1575,42 МГц ( $L1$ ) и 1227,6 МГц ( $L2$ ). На  $L2$  излучаются сигналы с военным кодом  $P(Y)$  с высокоточной информацией и защищенным от имитационных помех.

На  $L1$  излучаются сигналы и с военным кодом  $P(Y)$ , и с общедоступным гражданским кодом, который часто называют  $C/A$ . Прием сигналов по коду  $P(Y)$  обеспечивает работу с высокой точностью измерений. Сравнение времени прихода сигналов на частотах  $L1$  и  $L2$  позволяет вычислить дополнительную

задержку, возникающую при прохождении радиоволн через ионосферу, что значительно повышает точность измерений навигационных данных.

Прием сигналов на частоте  $L1$  с кодом  $C/A$  не позволяет определить ошибки, вносимые ионосферой. Структура кода  $C/A$  обеспечивает худшие характеристики в режиме SPS (стандартная точность измерений). Так, если в режиме PPS (высокая точность измерений) с вероятностью 0,95 ошибки измерения долготы и широты не превышают 22–23 метра, высоты 27–28 метров и времени 0,09 мкс, то в SPS они увеличиваются соответственно до 100 метров, 140 метров и 0,34 мкс. Первоначально режим SPS был необходим для грубого определения пользователями своих координат для вхождения в код  $P(Y)$ .

В настоящее время уровень электроники программного обеспечения и методов обработки навигационной информации позволяет осуществлять достаточно быстрый захват  $P(Y)$  без кода  $C/A$ , а также проводить высокоточные определения по фазе несущей сигнала. Кроме того, полностью отработанный наземный автоматический режим дифференциальной коррекции позволяет в ограниченном регионе получать точное определение относительных координат взаимного расположения двух приемников, отслеживающих сигналы одних и тех же ИСЗ GPS. При использовании гражданского  $C/A$ -кода определяют координаты автомобиля с точностью от 2 до 5 метров.

Спутники имеют трехосную стабилизацию и позволяют обеспечить определение времени с точностью до 0,000001 с, положение объекта с точностью до единиц метров и скорость – примерно до 0,1 м/с. Срок службы спутников порядка 10 лет.

Группировка ИСЗ ГЛОНАСС позволяет определить координаты с погрешностью не более 50 м для гражданского кода. Создан наземный сегмент управления спутниками, разработанный в СССР и реализованный в России.

### **2.3 Система местоопределения, использующая геостационарные спутники связи**

Широкое развитие получила спутниковая связь на основе геостационарных спутников, вращающихся на экваториальных орбитах с периодом 24 часа. Эти спутники используют как неподвижные опорные радионавигационные точки для измерения относительно них координат подвижных объектов.

Схема построения системы местоопределения с двумя геостационарными спутниками связи представлена на рисунке 2. Примером таких систем могут служить системы EUTELTRACS (ЕСА) и GEOSTAR (США) [2].

Спутники ГСС-1 и ГСС-2 не являются составной частью системы местоопределения, они выполняют роль ретрансляторов сигналов в линии радиосвязи между наземной станцией центра сбора и аппаратурой подвижного объекта. При этом ГСС-1 обеспечивает ретрансляцию сигналов от наземной станции к подвижному объекту и обратно, а ГСС-2 только от подвижного объекта к наземной станции.

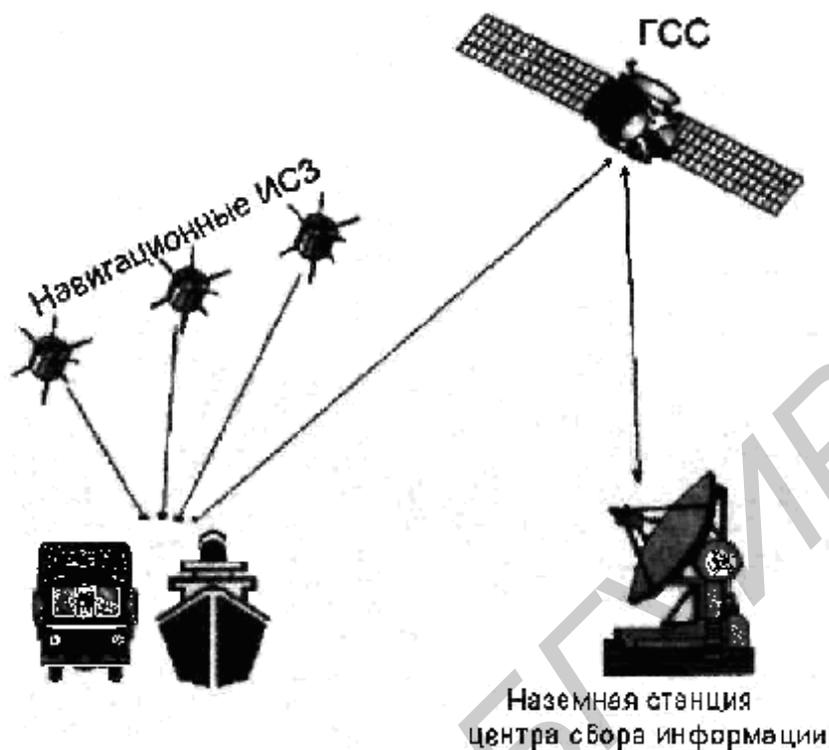


Рисунок 2 – Схема построения системы местоопределения с геостационарными спутниками связи

Координаты подвижного объекта вычисляются на наземной станции по сигналам, полученным от подвижного объекта с двух направлений (от ГСС-1 и ГСС-2). Система четырех объектов, в которой координаты трех объектов ГСС-1, ГСС-2 и наземной станции известны, позволяет рассчитать координаты четвертого объекта, если измерить дальности от подвижного объекта до ГСС-1 и ГСС-2.

Порядок вычислений можно представить следующим образом. Если измерены дальности от ГСС-1 и ГСС-2 до объектов  $L1$  и  $L2$ , то подвижный объект находится на линии пересечения двух сфер, описанных радиусом  $L1$  с центром на ГСС-1 и радиусом  $L2$  с центром на ГСС-2. Пересечение же этой линии с поверхностью Земли даст точку местоположения подвижного объекта.

Значения  $L1$  и  $L2$  определяются вычитанием из известных расстояний от наземной станции до ГСС-1 и ГСС-2 дальностей от наземной станции до подвижного объекта через ГСС-1 и ГСС-2 соответственно. Эти дальности определяются на наземной станции по временной задержке между запросным сигналом от наземной станции и ответными сигналами от подвижного объекта, принимаемыми через ГСС-1 и ГСС-2. Полученные на наземной станции координаты подвижного объекта могут быть переданы ему по каналу связи через ГСС-1.

Аппаратура каждого подвижного объекта имеет свой код, что позволяет наземной станции устанавливать связи одновременно со всеми объектами, с группой объектов или с одним объектом.

В нормальном состоянии аппарата на подвижном объекте находится в пассивном режиме (прием сигналов от наземной станции). Активизация (включение передатчика) аппаратуры осуществляется по запросу от наземной станции. Наземная станция и центр сбора могут быть совмещены или соединены между собой отдельным каналом связи (радиорелейным, телефонным, спутниковым).

## 2.4 Глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС)

Сетевая среднеорбитальная СРНС ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система) предназначена для непрерывного и высокоточного определения пространственного (трехмерного) местоположения вектора скорости движения, а также времени космических, авиационных, морских и наземных потребителей в любой точке Земли или околоземного пространства (рисунок 3).

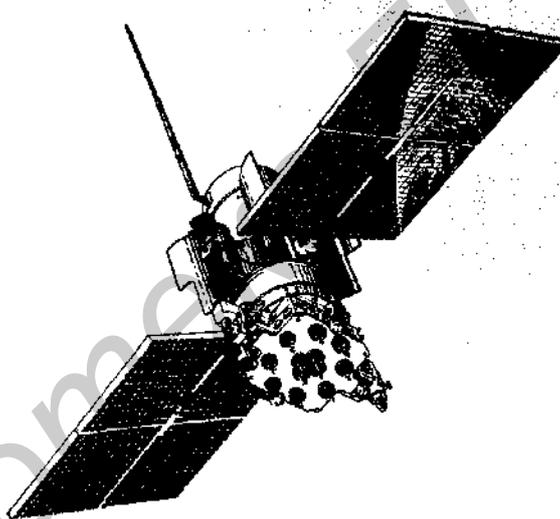


Рисунок 3 – Российский спутник ГЛОНАСС-М

Она состоит из трех подсистем:

- подсистема космических аппаратов (ПКА), состоящая из навигационных спутников ГЛОНАСС на соответствующих орбитах;
- подсистема контроля и управления (ПКУ), состоящая из наземных пунктов контроля и управления;
- аппаратура потребителей (АП).

Навигационные определения в ГЛОНАСС осуществляются на основе опросных измерений в аппаратуре потребителей псевдодальности и радиальной псевдоскорости до четырех спутников (или трех спутников при использовании дополнительной информации) ГЛОНАСС, а также с учетом принятых навигационных сообщений этих спутников. В навигационных сообщениях, передаваемых с помощью спутниковых радиосигналов, содержится информация о

различных параметрах, в том числе и необходимые сведения о положении и движении спутников в соответствующие моменты времени [3].

Назначение: обеспечение навигационной информацией и сигналами точного времени военных и гражданских наземных, морских, воздушных и космических потребителей.

С 1996 г. по предложению Правительства Российской Федерации Международная организация гражданской авиации и Международная морская организации используют систему ГЛОНАСС вместе с системой GPS (США) в качестве международных.

Характеристики систем приведены в таблице 1.

Таблица 1

Зона обслуживания	Глобально по поверхности Земли в воздушном и околоземном космическом пространстве
Возможность использования	В любой момент независимо от времени суток, года и метеоусловий
Точность навигационных определений (вероятность 0,95): в стандартном режиме: по плановым координатам по высоте по скорости по времени привязки к госэталоны в дифференциальном режиме	≈ 20 м ≈ 30 м 5 м/с 0,7 мкс от 0,1 до 5 м
Доступность	99,64 %
Количество КА в орбитальной группировке	24 (по 8 КА в трех плоскостях)
Орбита	Круговая
Высота	19 140 км
Наклонение	64,8°
Частотный диапазон	≈ 1,6 ГГц
Частота L1	≈ 1,2 ГГц
Гарантированный срок функционирования КА	7 лет
Средства выведения: одиночный запуск с к. Плесецк групповой запуск (3 КА) с космодрома Байконур	РФ «Союз-2» и РБ «Фрегат» РФ «Протон» и РБ «Бриз-М»

## **2.5 Система глобального позиционирования (GPS)**

Спутниковая система определения местонахождения подвижных объектов (Global Positioning System (GPS)) создана Министерством обороны США. Позволяет с точностью до 20 м определять в любой точке земного шара место нахождения неподвижного либо движущегося объекта на земле, в воздухе и на море в трех измерениях с очень высокой точностью. Более того, GPS сообщает скорость передвижения объекта. Эта система позволяет оснастить речные и морские суда, автомобили, самолеты электронными картами, на которых показывается место нахождения объекта и кратчайший (либо наиболее удобный) путь к пункту назначения. GPS используется также для составления географических карт и в геодезии. Система широко используется и гражданскими абонентами [3].

GPS создана в спутниковой сети, образованной спутниками связи, вращающимися вокруг Земли по высоким орбитам. В 1995 г. сеть включает 24 спутника. Для вхождения в GPS каждый абонент должен иметь небольшое устройство. Последнее в бытовом варианте имеет размер, равный портсигару, что позволяет носить его в кармане костюма. Устройство с высокой точностью показывает три координаты объекта, находящегося в любой точке планеты. Одним из важнейших компонентов устройства являются атомные часы, способные измерять время с точностью до наносекунды. Сигналы устройства синхронизируются с приемопередатчиками спутников связи.

## **2.6 Спутниковая система навигации Галилео (Galileo)**

Галилео (Galileo) – европейский проект спутниковой системы навигации, которая предназначена для решения навигационных задач для любых подвижных объектов с точностью менее одного метра.

Первый спутник этой системы – Giove A – был запущен с космодрома Байконур 28 декабря 2005 г. Пока этот спутник работает в демонстрационном режиме, поэтому использовать его данные для навигации невозможно. Зато с его помощью ученые смогут исследовать радиационную обстановку на орбите, а также проверить навигационные технологии, которые впоследствии будут обеспечивать работоспособность спутниковой навигационной системы.

Планируется, что Galileo будет состоять из 30 спутников, 27 из которых будут передавать данные, а три будут вертеться на своих орбитах, чтобы при выходе из строя одного из спутников не прекратила работать вся система.

Достоинство системы Galileo заключается в том, что с самого начала она разрабатывалась уже с оглядкой на действующую систему GPS и развивающуюся российскую ГЛОНАСС. То есть сигналы спутников разных систем не будут «конфликтовать» – наоборот, после окончания полномасштабного развертывания всех систем пользователи во всем мире получат супергруппировку спутников, которая будет обеспечивать максимально качественный сигнал даже

в самых неблагоприятных условиях, например в плотной высотной городской застройке.

## **2.7 Приемники спутниковых навигационных систем**

Навигационная аппаратура потребителей предназначена для приема и обработки радиосигналов НС с целью определения необходимой потребителям информации (пространственно-временных координат, направления и скорости, пространственной ориентации и т. п.). В состав НАП входят антенна с равномерной диаграммой направленности в верхнюю полусферу, высокочастотный приемник, осуществляющий фильтрацию и разделение сигналов.

В зависимости от типа НАП (носимая человеком, авиационная, морская, автомобильная, геодезическая и т. д.) в ней реализуются дополнительные сервисные функции, например, привязка к карте местности, движение по заданному маршруту, определение положения потребителя относительно заданной точки и др.

Области использования НАП СРНС неуклонно расширяются и в настоящее время охватывают авиацию, мореплавание, железнодорожный и автомобильный транспорт, геодезию и картографию, геодинамику и сейсмологию, военное дело, космонавтику, сельское хозяйство, системы связи и телекоммуникаций и т. д. [4].

### **2.7.1 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 [5].

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 рисунке 4 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.

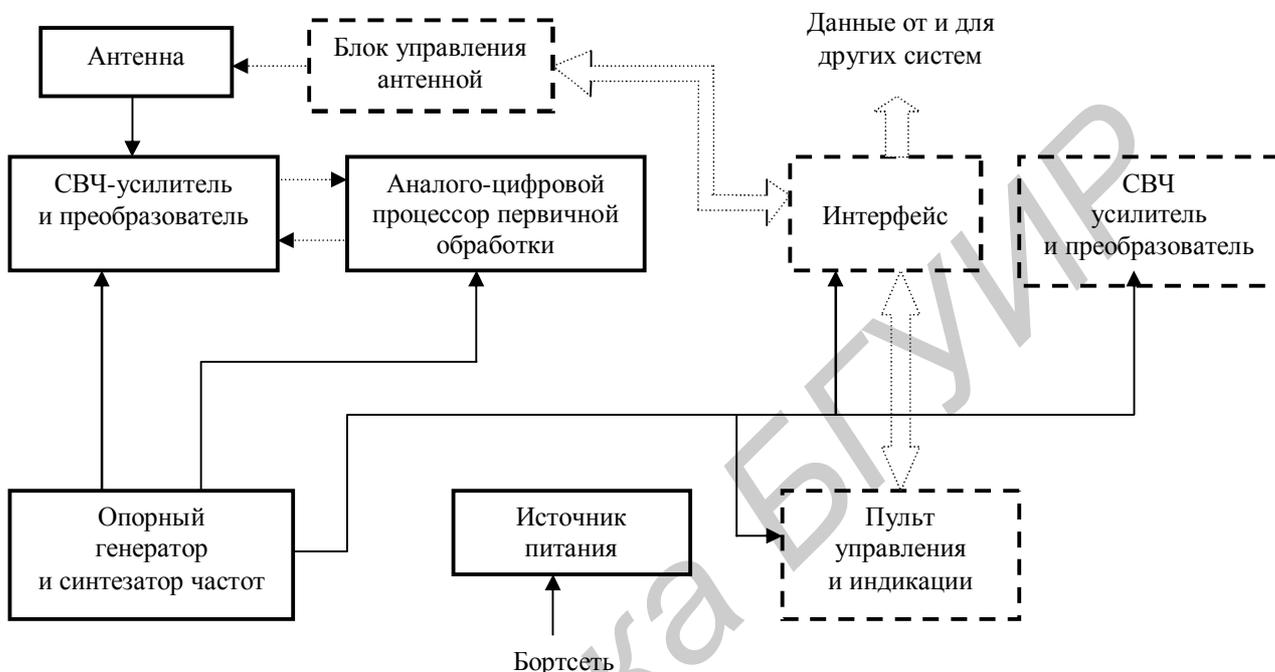


Рисунок 4 – Обобщенная структурная схема АП

Штриховыми линиями выделены блоки, наличие которых в составе АП не является обязательным и 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.

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.

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 [1, 5].

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 [5].

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.

### **2.7.2 Комбинированный приемник ГЛОНАСС/GPS**

В процессе выполнения работ по созданию аппаратуры потребителей спутниковых навигационных систем (СНС) ГЛОНАСС и GPS выработана определенная техническая идеология, позволяющая решать поставленные задачи. Она базируется на нескольких основополагающих принципах, главным из которых является принцип «базовости» технических решений. Этот принцип предполагает модульность построения схем, конструкций и программного обеспечения АП СНС, а также унификацию создаваемых модулей.

С целью достижения наибольшего эффекта от унификации модулей в качестве стандарта предприятия утверждены конструктивный, электрический, информационный интерфейсы, обеспечивающие взаимозаменяемость разработанных модулей сходного назначения.

Основой предлагаемой АП является модернизированный вариант комбинированного приемника ГЛОНАСС/GPS (рисунок 5). Приемник включает в себя ряд специализированных элементов, позволяющих достичь высоких технических характеристик и удовлетворить требования различных потребителей.

Приемник позволяет вести многоканальный прием и обработку сигналов СНС ГЛОНАСС в диапазоне  $F1$  и  $F2$ , а также  $C/A$  GPS на частоте  $L1$ . Количество каналов может наращиваться от 7 до 28. Приемник обеспечивает измерение псевдодальности с точностью 0,2 м и фазы несущей с точностью 4 мм, что обеспечивает создание на его основе высокоточной АП СНС различного назначения.

Особенностью приемника является совместное использование сигналов СНС ГЛОНАСС и GPS, что обеспечивает дополнительные преимущества за счет увеличения количества одновременно видимых навигационных спутников. При этом улучшаются доступность, целостность и надежность обсерваций.

Основные требования к радиоприемному устройству (РПУ):

- рабочие частоты приема определяются принимаемым сигналом от СНС;
- уровень восприимчивости на рабочей частоте приема (реальная чувствительность) не более (не хуже) минус 165 дБ/Вт;
- относительный уровень восприимчивости к синусоидальной помехе с частотой, попадающей в полосу рабочих частот приема, не менее 21 дБ при приеме сигнала СНС ГЛОНАСС и не менее 24 дБ при приеме сигнала СНС GPS;
- уровень восприимчивости по побочным каналам приема не менее 70 дБ/Вт;
- относительный уровень восприимчивости по зеркальному каналу приема не менее 50 дБ.

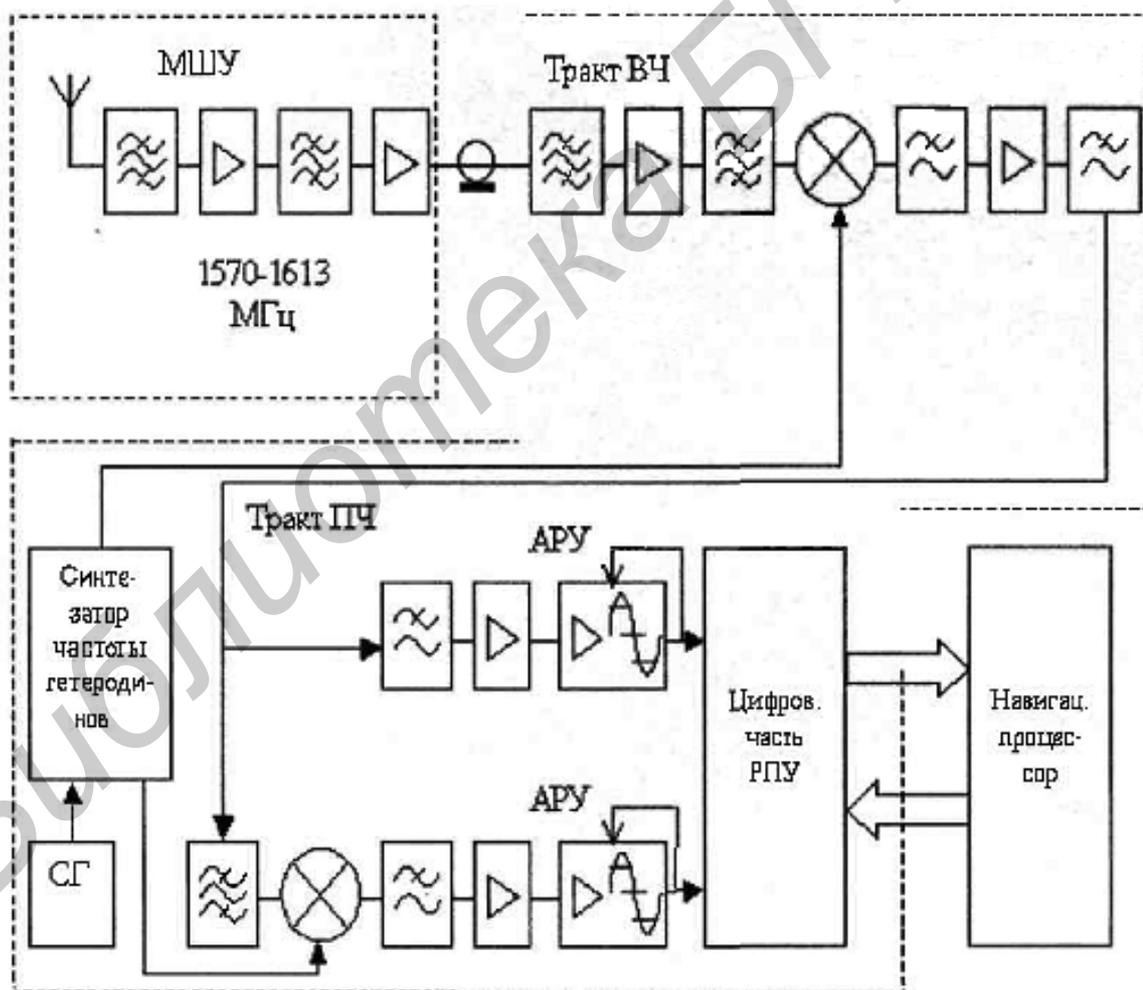


Рисунок 5 – Структурная схема приемника ГЛОНАСС/GPS КБ «НАВИС»

В результате развертывания новых систем радиосвязи в диапазоне 1...2 ГГц в настоящее время существует тенденция повышения плотности радиопомех в диапазоне частот, примыкающих к полосе рабочих частот приема АП СНС. Поэтому к РПУ предъявляется требование обеспечения повышенной помехозащищенности на объектах отдельных групп потребителей.

Для решения этой задачи предложен базовый вариант приемного тракта с возможностью увеличения помехозащищенности путем включения в состав радиоприемного устройства дополнительного устройства повышенной селекции (через стандартные радиочастотные разъемы в коаксиальную линию связи).

РПУ решает следующие задачи:

- селекция входных сигналов по частоте;
- усиление входных сигналов;
- перенос спектра рабочих частот приема в диапазон промежуточных частот 9...23 МГц;
- селекция и усиление сигналов на промежуточных частотах;
- синтезирование опорных сигналов для цифровой обработки информации и гетеродинного сигнала для преобразования частоты входных сигналов;
- формирование широкополосных сигналов СНС ГЛОНАСС в диапазоне частот 9...23 МГц и СНС GPS на частоте 20,42 МГц с трехуровневым квантованием сигналов по выходу;
- обработка широкополосных сигналов СНС ГЛОНАСС и GPS и получение отсчетов по каналам, работающим параллельно;
- формирование сетки частот, синхронизирующих работу составных частей цифрового тракта.

Цифровая часть РПУ строится на базе цифрового БМК, функционально представляющего собой 7-канальный процессор обработки сигналов ГЛОНАСС/GPS, который решает следующие задачи:

- преобразование широкополосных сигналов на промежуточных частотах 9...23 МГц в сигналы с «нулевой» несущей;
- корреляционная свертка широкополосных сигналов;
- поиск и обнаружение принимаемых сигналов на фоне шумов и помех;
- помехоустойчивое узкополосное слежение по фазе дальномерного кода и по фазе несущей частоты;
- помехоустойчивое выделение эфемеридной информации;
- получение отсчетов псевдодальности, доплеровского смещения несущей частоты и эфемеридной информации.

БМК обеспечивает работу в аппаратуре потребителей, обладающих различной динамикой. Работа на объектах с разной динамикой обеспечивается программной перестройкой колец слежения по несущей и по фазе кода. Темп выдачи навигационных параметров и приема управляющей информации составляет 100 мс. В БМК предусмотрена возможность каскадирования для наращивания общего числа каналов до 28 (режим ведущий – ведомый).

В состав аналогового тракта РПУ могут быть включены дополнительно радиочастотные устройства: модуль повышенной селекции (МПС), модуль дополнительного усиления (МДУ).

Радиочастотные модули являются функционально и конструктивно завершенными узлами и включаются в коаксиальную линию связи между антенным блоком и приемовычислителем.

Включение МПС обеспечивает повышение помехозащищенности аппаратуры НАП при воздействии помех с частотами, примыкающими к полосе рабочих частот приема (например помехи от передатчика системы САТКОМ). При включении в состав аналогового тракта РПУ одного модуля повышенной селекции уровень помехи частоты 1626,5 МГц на входе ВЧ-части уменьшается на 24 дБ. При этом тракт ВЧ-части обеспечивает помехозащищенность по помехе от передатчика системы САТКОМ при уровне помехи минус 22 дБ/Вт на выходе антенного излучателя (согласно стандарту ARINC 743A).

Включение МДУ обеспечивает возможность увеличения длины коаксиальной линии связи между антенным блоком и приемовычислителем на 20...50 м.

В связи с вводом в эксплуатацию системы Globalstar, работающей в диапазоне частот, примыкающем к рабочему диапазону ГЛОНАСС, возникла проблема обеспечения совместимости АП СНС с наземными терминалами этой системы. В приемнике ГЛОНАСС/GPS эта проблема решена, в том числе с учетом изменения частотного плана ГЛОНАСС после 2005 г.

В серии специально поставленных экспериментов подтверждено соответствие предъявляемым требованиям основных характеристик приемника. Точность измерения псевдодальности 0,2...0,3 м и точность измерения фазы несущей 0,005 м, подтвержденные в ходе проведенных экспериментов, позволили начать работы по созданию АП СНС различного назначения.

Специальная серия экспериментов проведена с целью определения степени восприимчивости разработанного приемника к многолучевости сигнала из-за переотражений от подстилающей поверхности и окружающих предметов. При этом подтверждена малая восприимчивость к многолучевости, что позволяет создавать на базе приемника высококачественную аппаратуру.

Основным и наиболее сложным узлом АП СНС является модуль приемовычислителя, объединяющий функции приемника сигналов СНС и навигационного процессора. В соответствии с принятой идеологией разработано пять типов взаимозаменяемых базовых модулей приемовычислителей, отличающихся количеством каналов приема и возможностями навигационного процессора.

Разработана библиотека программных модулей для построения проектов программно-математического обеспечения АП СНС.

Стандартный набор функций навигационного базового модуля включает в себя 14-канальный прием и обработку сигналов СНС, решение навигационной задачи определения координат, скорости и времени (в том числе в дифференциальном режиме), функцию RAIM, обмен с внешними потребителями через два порта RS232E по протоколам NMEA0183, BINR, RTCM104.

Базовый модуль для частотно-временной синхронизации, кроме перечисленных выше функций, обеспечивает измерение температуры опорного генератора, контроль управляющего напряжения опорного генератора, управление сдвигом метки времени и частотой опорного генератора для синхронизации метки времени и частоты опорного генератора по UTC.

Базовый модуль для опорной станции дифференциального режима имеет 28 каналов приема и обработки сигналов СНС и программное обеспечение выработки корректирующей информации в соответствии с рекомендациями RTCM104.

Кроме базовых модулей приемовычислителей, имеется ряд совместимых с ними вспомогательных модулей, необходимых для создания АП СНС.

Для различных потребителей разработан и выпускается ряд приемных антенн ГЛОНАСС/GPS.

Внешний вид портативного навигационного GPS-приемника и образцы документации приведены на рисунках 6 и 7.



Рисунок 6 – Внешний вид портативного навигационного GPS-приемника GARMIN eTrex



Рисунок 7 – Документация на GPS-навигатор

### 3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- 1 Изучить теоретический материал.
- 2 Получить и выполнить индивидуальное задание от преподавателя по работе с GPS-приемником.
- 3 Выполнить на ПЭВМ задание на лабораторную работу, определяемое пунктами меню программы.
- 4 Выполнить на ПЭВМ тест, предусмотренный программой лабораторной работы (на тестовое задание дается всего 15 минут, поэтому предварительно внимательно изучите теорию).
- 5 Составить и защитить отчет.

### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В. С. Шебшаевич [и др.] ; под ред. И. С. Шебшаевича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1993.
- 2 Устименко, В. Г. Системы радионавигации : учеб. пособие по курсу «Системы радионавигации» для студ. спец. Т.09.02.00 «Радиотехнические системы» / В. Г. Устименко, О. В. Шабров. – Минск : БГУИР, 2001. – 79 с.
- 3 Яценков, В. С. Основы спутниковой навигации: системы GPS, Navstar и ГЛОНАСС / В. С. Яценков. – М. : Горячая линия – Телеком, 2005.
- 4 ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Р. В. Бакитко [и др.] ; под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. – М. : Радиотехника, 2005.
- 5 Системы радионавигации : метод. указания к лаб. работе «Исследование точностных характеристик аппаратуры потребителей GPS» для студ. спец. 39 01 02 «Радиоэлектр. системы» днев. формы обуч. / сост. О. В. Шабров. – Минск : БГУИР, 2004. – 24 с.
- 6 Карлащук, В. И. Спутниковая навигация. Методы и средства / В. И. Карлащук, С. В. Карлащук. – М. : СОЛОН-Пресс, 2006.
- 7 Харисов, В. Н. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / В. Н. Харисов, А. И. Перов, В. А. Болдина. – М. : ИПРЖР, 1998.
- 8 Власов, И. Б. Глобальные навигационные спутниковые системы : учеб. пособие / И. Б. Власов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 182 с.
9. Все о GPS-навигаторах. – М. : НТ Пресс, 2005. – 392 с.

Учебное издание

## **ПРИЕМНИКИ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Методические указания к лабораторной работе  
по курсу «Сетевые технологии и сигнализация в телекоммуникациях»  
для студентов специальности 1-45 01 03 «Сети телекоммуникаций»  
всех форм обучения

Составитель:  
**Астровский Иван Иванович**

Редактор Е. Н. Батурчик  
Корректор Л. А. Шичко

---

Подписано в печать  
Гарнитура «Таймс».  
Уч.-изд. л. 1,0.

Формат 60x84 1/16.  
Печать ризографическая.  
Тираж 50 экз.

Бумага офсетная.  
Усл. печ. л.  
Заказ 435.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.  
220013, Минск, П. Бровки, 6