

УДК 656.13.08**Ю.Е. Воронов, А.В. Косолапов**

СРАВНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ, ПРИМЕНЯЕМЫХ НА АВТОМОБИЛЬНОМ ТРАНСПОРТЕ

За последние несколько лет большую популярность в мире завоевали системы глобального позиционирования (определения точного местоположения). Это, действительно, очень перспективный рынок. По прогнозу консалтинговой фирмы Renaissance Strategy, объем мирового рынка услуг глобального позиционирования к 2003 г. должен увеличиться до \$500 млн., а по прогнозу компании Ovum в 2005 г. его объем составит \$9 млрд. (при 376 млн. абонентах).

Появление на мировом рынке услуг, предоставляемых спутниковыми навигационными системами, обеспечило массовое внедрение во все области человеческой деятельности космических технологий. Ярким примером является тот факт, что по различным оценкам услугами таких систем сейчас пользуются от 10 до 12 млн. пользователей (от охотников и рыболовов до государственных учреждений и международных организаций) во всем мире. Обе системы открыты для широкого использования благодаря сделанным Правительствами России и США в 1998 году заявлениям о предоставлении их услуг международному сообществу на безвозмездной основе.

Первые системы глобального позиционирования GPS (Global Positioning System) разрабатывались исключительно для военных целей. Глобальная навигационная система GPS предназначена для передачи навигационных сигналов, которые могут одновременно приниматься во всех регионах мира. Инициатором создания GPS-системы стало Министерство обороны США. Ее разработка началась в 1973 г., когда Министерство обороны США перестала устраивать радионавигационная система, состоящая из наземных навигационных систем Loran-C и Omega и спутниковой системы TRANSIT.

В наземных радионавигационных системах радиосигналы излучаются стационарными наземными радиомаяками, координаты местоположения которых известны для потребителей.

В спутниковых радионавигационных системах (СРНС) применяются космические радиомаяки (навигационные искусственные спутники Земли - ИСЗ), и навигационные радиосигналы содержат эфемеридную информацию (ЭИ) о параметрах движения навигационных ИСЗ.

В 60-е годы XX века были созданы и введены в эксплуатацию СРНС первого поколения - система TRANSIT (США) и система ЦИКАДА (СССР).

В СРНС первого поколения орбитальная группировка содержит пять-шесть низкоорбитальных навигационных ИСЗ на круговых орbitах с высотой около 1 000 км над поверхностью

Земли. Навигационная аппаратура потребителя (НАП) на подвижном объекте принимает навигационные радиосигналы от радиовидимого навигационного ИСЗ в течение сеанса навигации продолжительностью 5...15 мин и проводит измерения приращения фазы несущего колебания принимаемого навигационного радиосигнала либо на коротких (2 с) интервалах времени (допплеровская навигация), либо на длинных (интегрально-допплеровская навигация). Измерения приращения фазы эквивалентны измерениям приращения дальности от объекта до навигационного ИСЗ на заданных интервалах времени. НАП на основе ЭИ, содержащейся в принимаемом навигационном радиосигнале, и результатов измерения приращений дальности до навигационного ИСЗ определяет (уточняет) две горизонтальные координаты объекта на поверхности земного эллипсоида.

Низкоорбитальные СРНС первого поколения обладают существенными недостатками:

- НАП в сеансе навигации определяет только горизонтальные координаты подвижного объекта без определения *высоты* местоположения объекта;
- сравнительно низкая точность определения горизонтальных координат подвижного объекта (70...100 м) из-за погрешностей учета собственного движения подвижного объекта;
- длительные перерывы между сеансами навигации до 0,5 ч в приполярных районах и до 2 ч в экваториальных районах.

Потребность в оперативной высокоточной навигации сухопутных, морских, воздушных и низкоорбитальных космических объектов обусловили создание в 80-90-е годы 20 века среднеорбитальных СРНС второго поколения - системы NAVSTAR (GPS) в США и системы ГЛОНАСС в России.

Принципы построения СРНС NAVSTAR и ГЛОНАСС в общих чертах идентичны, но отличаются техническим выполнением подсистем.

Проект создания спутниковой сети для определения координат в режиме реального времени в любой точке земного шара был назван NAVSTAR GPS (NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System - навигационная система определения времени и дальности). Используемая сейчас аббревиатура GPS появилась позднее, когда система стала использоваться не только для военных, но и для мирных целей. Первый GPS-спутник был запущен в феврале 1978 г. Первая штатная орбитальная группировка системы разворачивалась с июня 1989 г. по март 1994 г. На орбиту были выведены 24 навигационных спутника

Block II (рис. 1). Окончательно GPS-система была введена в эксплуатацию в 1995 г. В настоящее время она эксплуатируется и обслуживается Министерством обороны США.

Еще в 1983 г. США официально заявили, что GPS-система должна быть доступна каждому. Крайне важным для развития GPS-приложений стало и решение администрации США об отмене с 1 мая 2000 г. режима селективного доступа (SA - Selective Availability). Теперь каждый любительский GPS-терминал может определять координаты с точностью в несколько метров (а не несколько десятков метров, как раньше).

В состав GPS-системы входят 3 основных сегмента: космический, наземный и пользовательский.

Космический сегмент состоит из 28 автономных спутников, равномерно распределенных по орбитам с высотой 20 350 км (для полнофункциональной работы системы достаточно 24 спутников). Орбиты спутников просчитаны так, чтобы в любое время, в любой точке на Земле, были видны по крайней мере, четыре спутника. Спутники постоянно движутся со скоростью около 3 км/сек, имея период обращения $T=12$ ч 00 мин. Каждый спутник весит более 1 500 кг и имеет размер около 5 м (с раскрытыми солнечными батареями). Мощность радиопередатчика – не более 50 Вт.

Каждый спутник излучает на 2 частотах специальный навигационный сигнал, в котором зашифровано два вида кода L1 и L2. Один из них доступен лишь немногим пользователям, среди

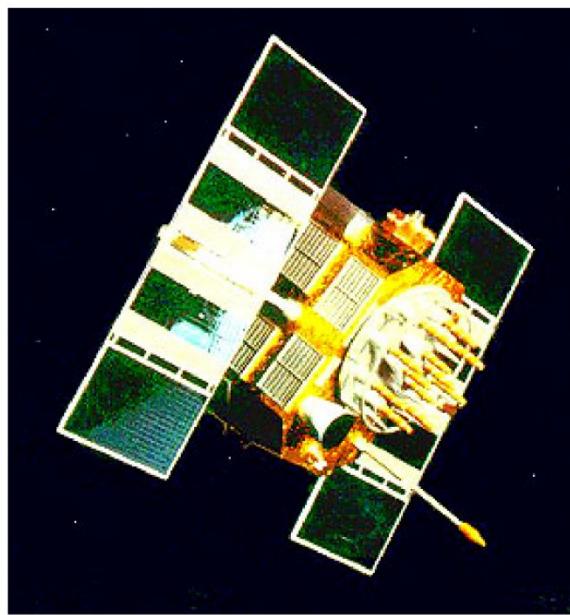


Рис. 1. Спутник системы GPS

которых, конечно же, военные и федеральные службы США. Кроме этих двух сигналов, спутник излучает и третий, информирующий пользователя о дополнительных параметрах (состоянии спутника, его работоспособности и др.). Гражданские GPS-приемники используют частоту L1, равную 1

575,42 МГц.

Спутники располагаются на круговых синхронных орbitах в шести орбитальных плоскостях (по четыре НКА в каждой) с наклонением 55^0 примерно между 60^0 северной и южной широты. Этим достигается то, что сигнал от хотя бы от некоторых спутников может приниматься повсеместно в любое время. Даже на полюсах можно “увидеть” спутники – правда, они не будут пролетать прямо над головой. Это, конечно, повлияет на геометрию и, следовательно, на точность, но лишь немного. Одним из важнейших преимуществ GPS перед существовавшими ранее наземными системами является *всепогодность*. Независимо от того, для каких целей используется навигация, GPS-приемник готов показать местоположение тогда, когда это нужно. Каждый спутник рассчитан на работу примерно в течение 10 лет. Новые спутники изготавливаются и запускаются на орбиту по мере необходимости. Работа всей системы запланирована и профинансирована минимум до 2006 г.

Параметры орбит спутников периодически контролируются сетью наземных станций слежения (всего 5 станций, находящихся в тропических широтах), с помощью которых (не реже 1...2 раз в сутки): вычисляются баллистические характеристики, регистрируются отклонения спутников от расчетных траекторий движения, определяется собственное время бортовых часов спутников, осуществляется мониторинг исправности навигационной аппаратуры и др. При этом для обнаружения отказов оборудования спутников с помощью наземных станций обычно требуется несколько часов.

Третий сегмент GPS-системы – это GPS-приемники, выпускаемые и как самостоятельные приборы (носимые или стационарные), и как платы для подключения к различного вида компьютерам и другим аппаратам.

Глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС) – это сумма уникальных технологий, плод многолетнего труда российских конструкторов и ученых. Она состоит из 24 спутников, которые, находясь в заданных точках на высоких орбитах, непрерывно излучают в сторону Земли специальные навигационные сигналы. Любой человек или транспортное средство, оснащенные специальным прибором для приема и обработки этих сигналов, могут с высокой точностью в любой точке Земли и околоземного пространства определить собственные координаты и скорость движения, а также осуществить привязку к точному времени. ГЛОНАСС является государственной системой, которая разрабатывалась как система двойного использования, предназначенная для нужд Министерства обороны и гражданских потребителей. Обязанности по управлению и эксплуатации системы ГЛОНАСС возложены на Министерство обороны Российской Федерации (Космические войска).

Первый запуск спутника по программе ГЛОНАСС (Космос-1413) состоялся 12 октября 1982 года. Система ГЛОНАСС официально принята в эксплуатацию 24 сентября 1993 года распоряжением Президента РФ 658рпс с неполной комплектацией орбитальной структуры при условии развертывания штатной орбитальной структуры (24 спутника) в 1995 году. Постановлением Правительства РФ от 7 марта 1995 г. №237 были организованы работы по полному развертыванию орбитальной структуры (24 спутника), обеспечению серийного производства навигационной аппаратуры и представлению ГЛОНАСС в качестве элемента международной глобальной навигационной системы для гражданских потребителей.

Спутники системы ГЛОНАСС непрерывно излучают навигационные сигналы двух типов: навигационный сигнал стандартной точности (СТ) в диапазоне L1 (1,6 ГГц) и навигационный сигнал высокой точности (ВТ) в диапазонах L1 и L2 (1,2 ГГц). Информация, предоставляемая навигационным сигналом СТ, доступна всем потребителям на постоянной и глобальной основе и обеспечивает, при использовании приемников ГЛОНАСС, возможность определения:

- горизонтальных координат с точностью 50...70 м (вероятность 99,7 %);
- вертикальных координат с точностью 70 м (вероятность 99,7 %);
- составляющих вектора скорости с точностью 15 см/с (вероятность 99,7 %);
- точного времени с точностью 0,7 мкс (вероятность 99,7 %).

Эти точности можно значительно повысить, если использовать дифференциальный метод навигации и/или дополнительные специальные методы измерений.

Сигнал ВТ предназначен, в основном, для потребителей МО РФ, и его несанкционированное использование не рекомендуется. Вопрос о предоставлении сигнала ВТ гражданским потребителям находится в стадии рассмотрения [1...6].

Для определения пространственных координат и точного времени требуется принять и обработать навигационные сигналы не менее чем от 4-х спутников ГЛОНАСС. При приеме навигационных радиосигналов ГЛОНАСС-приемник, используя известные радиотехнические методы, измеряет дальности до видимых спутников и измеряет скорости их движения.

Одновременно с проведением измерений в приемнике выполняется автоматическая обработка содержащихся в каждом навигационном радиосигнале меток времени и цифровой информации. Цифровая информация описывает положение данного спутника в пространстве и времени (эфемериды) относительно единой для системы шкалы времени и в геоцентрической связанной декартовой системе координат. Кроме того, цифровая информация описывает положение других спутников

системы (альманах) в виде кеплеровских элементов их орбит и содержит некоторые другие параметры. Результаты измерений и принятая цифровая информация являются исходными данными для решения навигационной задачи по определению координат и параметров движения. Навигационная задача решается автоматически в вычислительном устройстве приемника, при этом используется известный метод наименьших квадратов. В результате решения определяются три координаты местоположения потребителя, скорость его движения и осуществляется привязка шкалы времени потребителя к высокоточной шкале Координированного всемирного времени (UTC).

Система ГЛОНАСС включает в себя следующие компоненты:

- орбитальная структура спутников ГЛОНАСС (космический сегмент);
- наземный комплекс управления (сегмент управления);
- области применения (сегмент потребителей).

Полная орбитальная структура системы ГЛОНАСС состоит из 24 штатных спутников, равномерно размещенных в трех орбитальных плоскостях. Орбитальные плоскости разнесены относительно друг друга на 120° . Высота орбиты – 19 100 км (18 840...19 440 км). Наклонение орбиты - $64,8 \pm 0,3^{\circ}$. Номинальный период обращения НКА равен $T=11$ ч 15 мин 44 с.

Такая конфигурация орбитальной структуры позволяет обеспечивать глобальную и непрерывную зону действия системы, а также оптимальную геометрию взаимного расположения спутников для повышения точности определения координат.

Выведение спутников ГЛОНАСС на орбиту осуществляется с космодрома Байконур с помощью ракеты-носителя "Протон". Одним носителем одновременно выводятся три спутника ГЛОНАСС. Перевод каждого спутника в заданную точку орбитальной плоскости производится с помощью собственной двигательной установки.

Спутник ГЛОНАСС (рис. 2) конструктивно состоит из цилиндрического гермоконтеинера с приборным блоком, рамы антенно-фидерных устройств, приборов системы ориентации, панелей солнечных батарей с приводами, блока двигательной установки и жалюзи системы терморегулирования с приводами. На спутнике также установлены оптические уголковые отражатели, предназначенные для калибровки радиосигналов измерительной системы с помощью измерений дальности до спутника в оптическом диапазоне, а также для уточнения геодинамических параметров модели движения спутника. Конструктивно уголковые отражатели формируются в виде блока, постоянно отслеживающего направление на центр Земли. Площадь уголковых отражателей - $0,25 \text{ m}^2$.

Основные характеристики спутника ГЛОНАСС:

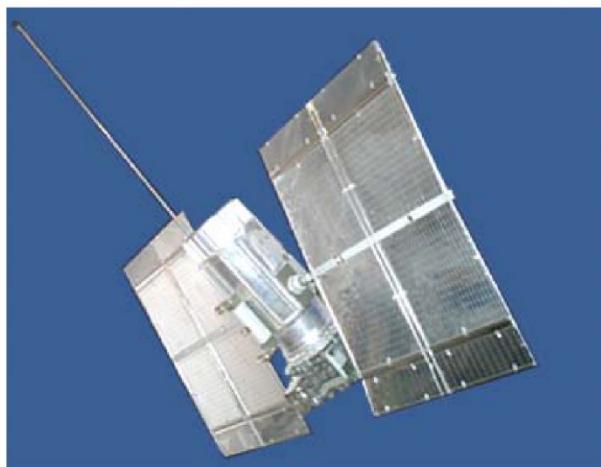


Рис. 2. Спутник системы ГЛОНАСС

- масса, кг - около 1 300;
- диаметр, м - 2,35;
- длина с развернутой штангой магнитометра, м - 7,84;
- ширина с развернутыми солнечными батареями, м - 7,23;
- тип навигационного сигнала - псевдошумовой с двоичной фазовой манипуляцией;
- скорость передачи данных, бит/с - 50;
- мощность принимаемого сигнала, дБт - -156/-161 .

В состав бортовой аппаратуры входят:

- навигационный комплекс;
- комплекс управления;
- система ориентации и стабилизации;
- система коррекции;
- система терморегулирования;
- система электроснабжения.

Навигационный комплекс обеспечивает функционирование спутника как элемента системы ГЛОНАСС. В состав комплекса входят: синхронизатор, формирователь навигационных радиосигналов, бортовой компьютер, приемник навигационной информации и передатчик навигационных радиосигналов. *Синхронизатор* обеспечивает выдачу высокостабильных синхрочастот на бортовую аппаратуру, формирование, хранение, коррекцию и выдачу бортовой шкалы времени. *Формирователь навигационных радиосигналов* обеспечивает формирование псевдослучайных фазоманипулированных навигационных радиосигналов содержащих дальномерный код и навигационное сообщение.

Комплекс управления обеспечивает управление системами спутника и контролирует правильность их функционирования. В состав комплекса входят: командно-измерительная система, блок управления бортовой аппаратурой и система телеметрического контроля. *Командно-измерительная система* обеспечивает измерение дальности в запросном режиме, контроль борт-

Таблица

Показатели	GPS	ГЛОНАСС
Орбитальная группировка		
Число КА	24 (28)	24
Число орбитальных плоскостей	6	3
Число КА в каждой плоскости	4	8
Высота орбиты, км	20 350	19 100
Наклонение орбиты, °	55	64,8
Период обращения КА, ч	12	11,26
Спутники		
Масса КА, кг	1 500	1 300
Мощность солнечных батарей, Вт	450	1 600
Срок эксплуатации, лет	10	2...3
Навигационные ретрансляторы		
Рабочие частоты, МГц	L1=1 575,42 L2=12 275,6	1 602,56...1 615,5
Мощность передатчика, Вт	50(L1), 8(L2)	н/д
Поляризация	Правосторонняя	Правосторонняя
Точность навигационных определений		
Погрешность определения местоположения, м	100 (SA-код), 16 (P-код)	50...70
Погрешность определения скорости движения, м/с	10 (SA-код), 0,1 (P-код)	0,15
Погрешность определения времени	340 нс (SA-код), 90 нс (P-код)	0,7 мкс
Надежность навигационных определений, %	95	99,7

Примечания: н/д – нет данных

вой шкалы времени, управление системой по разовым командам и временными программам, запись навигационной информации в бортовой навигационный комплекс и передачу телеметрии. **Блок управления** обеспечивает распределение питания на системы и приборы спутника, логическую обработку, размножение и усиление разовых команд.

Система ориентации и стабилизации обеспечивает успокоение спутника после отделения от ракеты-носителя, начальную ориентацию солнечных батарей на Солнце и продольной оси спутника на Землю, затем ориентацию продольной оси спутника на центр Земли и нацеливание солнечных батарей на Солнце, а также стабилизацию спутника в процессе коррекции орбиты.

Система коррекции обеспечивает приведение спутника в заданное положение в плоскости орбиты и его удержание в данных пределах по аргументу широты. Система включает двигательную установку и блок управления ей. Двигательная установка состоит из 24 двигателей ориентации с тягой 10 г и двух двигателей коррекции с тягой 500 г.

Система терморегулирования обеспечивает необходимый тепловой режим спутника. Регулирование тепла, отводимого из гермоконтаинера, осуществляется жалюзи, которые открывают или закрывают радиационную поверхность в зависимости от температуры газа. Отвод тепла от приборов осуществляется циркулирующим газом с помощью вентилятора.

Система электроснабжения включает солнечные батареи, аккумуляторные батареи, блок автоматики и стабилизации напряжения. Начальная мощность солнечных батарей - 1 600 Вт, площадь - 17,5 м². При прохождении спутником теневых участков Земли и Луны питание бортовых систем осуществляется за счет аккумуляторных батарей. Их разрядная емкость - 0 ампер-часов.

Для обеспечения надежности на спутнике устанавливаются по два или по три комплекта основных бортовых систем.

Таким образом, на спутник ГЛОНАСС возложено выполнение следующих функций:

- излучение высокостабильных радионавигационных сигналов;
- прием, хранение и передача цифровой навигационной информации;
- формирование, оцифровка и передача сигналов точного времени;
- ретрансляция или излучение сигналов для проведения траекторных измерений для контроля орбиты и определения поправок к бортовой шкале времени;
- прием и обработка разовых команд;
- прием, запоминание и выполнение временных программ управления режимами функционирования спутника на орбите;
- формирование телеметрической информа-

ции о состоянии бортовой аппаратуры и передача ее для обработки и анализа наземному комплексу управления;

- прием и выполнение кодов/команд коррекции и фазирования бортовой шкалы времени;
- формирование и передача признака неисправности при выходе важных контролируемых параметров за пределы нормы.

Управление спутниками ГЛОНАСС осуществляется в автоматизированном режиме.

Основными областями применения системы ГЛОНАСС являются:

- Министерство обороны ;
- транспорт: космический, воздушный, морской, речной, наземный ;
- прикладные задачи: геодезия, картография, океанография, геофизика, землеустройство, геология, добыча полезных ископаемых, рыболовство, экология ;
- научные задачи: фундаментальные и научно-экспериментальные исследования.

Необходимо заметить, что орбитальная группировка НКА с несинхронными круговыми орбитами ($T=11$ ч 16 мин) в системе ГЛОНАСС более стабильна по сравнению с ОГ НКА с синхронными круговыми орбитами ($T=12$ ч 00 мин) в системе NAVSTAR.

Каждой из этих систем присущи свои достоинства и недостатки, но общим для них является преимущество возможности глобально, непрерывно, вне зависимости от времени суток, погодных и иных условий определять координаты потребителя с достаточно высокой точностью (для GPS - до 100 м, для ГЛОНАСС - до 60 м).

Основные сравнительные характеристики спутниковых навигационных систем GPS и ГЛОНАСС можно свести в таблицу.

В качестве альтернативы монопольным системам двух сверхдержав в марте 2001 года Европейское сообщество (ЕС) приняло решение о развертывании собственной глобальной навигационной спутниковой системы GALILEO. В противовес системам ГЛОНАСС и GPS, контролируемым военными, ЕС намерено использовать GALILEO в гражданских целях.

Предполагается реализация европейского проекта глобальной навигационной спутниковой системы GNSS в два этапа: GNSS-1 и GNSS-2.

На первом этапе (2001-2003 г.г.) создается Европейская геостационарная система навигационного дополнения - European Geostationary Navigation Overlay System (EGNOS), которая будет обеспечивать те же услуги, что и GPS/ ГЛОНАСС в период с 2004 до 2015-2018 гг.

Основная часть проекта, GNSS-2, базируется на новой спутниковой системе, получившей название GALILEO. Ее орбитальная группировка будет развернута в 2007-2008 г.г.

Орбитальная группировка GALILEO будет состоять из 30 спутников: 27 основных и 3 резерв-

ных, необходимых на тот случай, если какой-либо из основных спутников выйдет из строя. Спутники будут располагаться на трех круговых орбитах на высоте в 23 616 км над поверхностью Земли. Наклон орбиты по отношению к экватору составит 56°. Такая конфигурация должна обеспечить эффективное покрытие всей территории планеты.

Стоимость проекта GALILEO - 3,6 млрд. евро. Как и GPS, сеть GALILEO будет служить, в первую очередь, в качестве навигационной поддержки для коммерческих транспортных сетей. Проект необходим как для научных исследований, так и для экономических и социальных нужд. GALILEO создаст рынок для оборудования и услуг объемом примерно в 80 млрд. евро на протяжении 15 лет, а также 150 тыс. дополнительных рабочих мест.

В отличие от главных конкурентов, уже существующих систем спутниковой навигации GPS (США) и ГЛОНАСС (Россия), европейская система будет находиться в ведении невоенной организации. Созданный Европейским космическим агентством (ЕКА) в сотрудничестве с ЕС, проект GALILEO обеспечит Европу собственной глобальной навигационной спутниковой системой, позволяющей с высокой точностью определять местоположение объекта и гарантировать глобальное покрытие. При этом пользователи смогут пользоваться теми же приемниками с возможностью выбирать данные спутника любой из систем.

Предлагая двойные частоты в качестве стандарта, GALILEO будет представлять в реальном времени местоположение объекта с точностью в диапазоне одного метра. Это беспрецедентная детализация для публично доступной системы.

Все вышеизложенное обусловило широкое применение этих технологий при создании систем диспетчерского управления и контроля транс-

портных средств различного назначения. Такие системы обеспечивают потребителю контроль за местоположением своего транспорта, его состоянием, состоянием перевозимых грузов при решении проблем повышения мобильности, оперативности и безопасности перевозок, а также управления ими. Принцип их действия прост - с помощью ГЛОНАСС/GPS-навигационных приемников на транспортном средстве определяются его координаты и вместе с информацией о его состоянии и состоянии груза по каналам связи передаются на диспетчерский пост. С диспетчерского поста передаются текстовые и формализованные сообщения экипажам транспортных средств.

Основные возможности GPS-системы (при наличии приемника GPS-сигнала):

- определение местонахождения транспортного средства;
- определение наиболее короткого и удобного пути до пункта назначения;
- определение обратного маршрута;
- определение скорости движения (максимальной, минимальной, средней);
- определение времени в пути (прошедшего и сколько потребуется еще) и др.

Резюмируя, можно утверждать, что стратегической целью проектов спутниковых навигационных систем является интеграция технологий глобального позиционирования, технологий беспроводной связи и Интернет-технологий для создания системы передачи информации о местонахождении транспортных средств через Интернет, которая позволит разнообразным государственным и коммерческим структурам повысить эффективность управления своими ресурсами и автопарком, а также предоставит многообразные дополнительные услуги физическим лицам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 7 марта 1995 г. № 237 "О проведении работ по использованию глобальной навигационной спутниковой системы "ГЛОНАСС" в интересах гражданских потребителей".
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 15 ноября 1997 г. № 1435 "О Федеральной целевой программе по использованию глобальной навигационной спутниковой системы "ГЛОНАСС" в интересах гражданских потребителей".
3. Инструкция о порядке оформления и выдачи разрешений на эксплуатацию автономных средств определения геоцентрических координат (геодезических спутниковых приемников) на территории Российской Федерации. Приказ Начальника Главгоссвязьнадзора России от 26.03.99 № 18.
4. Постановление Правительства Российской Федерации от 3 августа 1999 г. № 896 "Об использовании в РФ глобальных навигационных спутниковых систем на транспорте и в геодезии".
5. Постановление Правительства Российской Федерации от 28 июля 2000 г. № 568 "Об установлении единых государственных систем координат".
6. Постановление Правительства Российской Федерации от 21 сентября 2000 г. № 699 "О внесении изменения в постановление Правительства Российской Федерации от 15 ноября 1997 г. № 1435"

Авторы статьи:

Воронов
Юрий Евгеньевич
- докт. техн. наук, проф., зав. каф.
«Автомобильные перевозки»

Косолапов
Андрей Валентинович
- канд. техн. наук, доц. каф. «Автомобильные перевозки»