

Анализ направлений и состояния разработок функциональных дополнений к спутниковым радионавигационным системам

Сергей МИХАЙЛОВ
Mikhaylov@geyser.ru
Виктор Кульнев
Kulnev@geyser.ru

Спутниковые технологии навигации и геодезии в настоящее время переживают стремительный технический прогресс, связанный с предоставлением мировому сообществу странами, владельцами спутниковых радионавигационных систем GPS (Global Positioning System – США) и ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система – Российская Федерация) в неограниченное и бесплатное использование. Темп роста объема рынка сегодня, по данным зарубежных экспертов, составляет 25% ежегодно по отношению к предыдущему году. По ряду прогнозов, в 2010 году потенциальный объем мирового рынка в данной области превысит 160 млн пользователей.

В настоящий момент можно констатировать, что в России идет процесс постепенного внедрения и использования высоких спутниковых технологий в различных областях хозяйствования, обороны, науки, техники и т. д. Некоторые ведомства, государственные и частные предприятия и организации владеют соответствующим оборудованием и технологиями точного позиционирования и используют их для решения своих частных целевых задач.

Как и в любой сложной технической системе, компоненты космических навигационных систем функционируют не идеально. В силу этого значения координат и скорости, получаемые потребителем в навигационном решении, отличаются от реальных. На точность решения навигационной задачи по определению местоположения объекта влияют следующие факторы:

- геометрическое расположение навигационных космических аппаратов (НКА), используемых в решении;
- погрешности формирования бортовых шкал времени НКА;
- эфемеридные погрешности НКА;
- погрешности за счет распространения навигационных радиосигналов в атмосфере (ионосферные и тропосферные погрешности);
- аппаратные погрешности НАК;
- наличие в системе специальных мер по загрождению точности (селективный доступ в системе GPS).

- Радикальным направлением повышения точности навигационных определений является дифференциальный режим навигации. Его суть заключается в устранении некоторых погрешностей навигационного поля системы, сильно коррелированных в локальных районах (до 2000 км).

К сильнокоррелированным можно отнести погрешности навигационных определений, обусловленные следующими факторами:

- рассинхронизацией бортовых шкал времени (ШВ) НКА;
- влиянием погрешностей эфемерид НКА;
- распространением навигационных сигналов в ионосфере и тропосфере.
- Получив аппаратными методами или расчетным путем величины этих систематических погрешностей (так называемых дифференциальных поправок), можно реализовать в аппаратуре потребителя компенсацию основных систематических погрешностей навигационных определений путем их учета в алгоритмах обработки навигационных данных. Совокупность аппаратных и программных средств, предназначенных для повышения точности навигационных определений на основе штатного сигнала СРНС, называют функциональными дополнениями.

Задачи функциональных дополнений и пути их реализации

Основными задачами функциональных дополнений являются:

- обеспечение требуемой целостности спутниковых радионавигационных систем;
- обеспечение требуемой доступности СРНС;
- обеспечение необходимой непрерывности навигационных определений;
- повышение точности навигации до требуемой.
- Указанные задачи решаются использованием следующих методик:
- использования дифференциального режима работы для повышения точности навигационных определений;
- введения дополнительных спутников (геостационарных) для повышения доступности;
- ведение наземных станций контроля целостности и специального канала передачи данных

о целостности (GIC — GPS Integrity Channel) для повышения целостности.

- Повышение целостности предусматривает наличие сети станций контроля целостности для обеспечения непрерывного контроля работоспособности системы в реальном масштабе времени и регионального вычислительного центра для обработки полученных от сети станций данных и формирования данных о целостности для передачи их потребителям.

В качестве каналов передачи информации о целостности СРНС GPS и ГЛОНАСС, обеспечивающих основные требования к ним, предлагаются каналы связи через геостационарные спутники. При использовании канала целостности только для передачи информации о целостности и других данных он, как правило, является узкополосным.

В случае необходимости передачи необходимых данных в каналах целостности сигналов, подобных радионавигационным сигналам GPS и ГЛОНАСС, он является широкополосным. В этом случае обеспечивается не только передача данных, но и навигационные измерения. Реализуются две возможности: резервное измерение дальности в случае возникновения спутниковых отказов, а также передача сигналов предупреждения.

Это позволяет повысить целостность системы, а также повысить доступность системы за счет дополнительных радионавигационных сигналов. При этом за счет передачи дифференциальных поправок в составе информации можно реализовать дифференциальный режим работы на широких районах (широкозонный дифференциальный режим).

Состав и виды функциональных дополнений ГНС

В зависимости от методов решения поставленных задач и места размещения элементов функциональных дополнений различают 3 типа функциональных дополнений:

- автономные функциональные дополнения, реализуемые на борту надводных кораблей или на борту воздушного судна — Aircraft-based Augmentations Systems (ABAS) (по классификации ИКАО), использующие автономные методы контроля целостности RAIM & AAIM;
- наземные функциональные дополнения — Ground-based Augmentation Systems (GBAS) (DGPS, LAAS, GRAS);
- космические функциональные дополнения — Space-based Augmentation Systems SBAS (WAAS, EGNOS, MSAS).

Автономные функциональные дополнения (Aircraft-based Augmentations Systems (ABAS))

Функциональные дополнения, реализуемые на борту надводных кораблей или воздушных судов потребителей, для решения задач контроля целостности, повышения точности и надежности навигационных определений используют технические средства, расположенные на борту потребителя.

Бортовое дополнение ABAS по сути является усовершенствованием системы автономного контроля целостности в навигационном приемнике, обычно именуемом RAIM, путем использования информации других бортовых систем потребителя (самолета, морского судна). Вся доступная на борту потребителя навигационная информация в этом

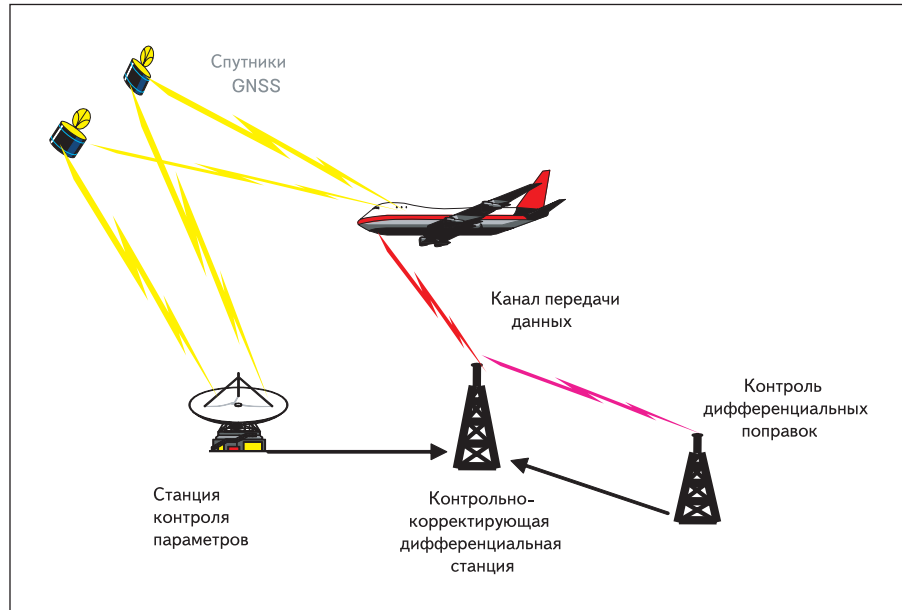


Рис. 1. Обобщенная структурная схема построения наземного функционального дополнения

случае используется для обеспечения требуемых характеристик навигационного обеспечения.

Для этого применяются различные методы, основными из которых являются следующие.

1. Использование в НАП алгоритмов автономного контроля целостности (RAIM), среди которых можно выделить:

- алгоритмы обнаружения отказов;
- алгоритмы исключения отказавших навигационных спутников.

2. Использование методов бортового контроля целостности AAIM (Airborne Autonomous Integrity Monitoring).

3. Комплексирование с навигационными датчиками, установленными на объекте. Среди них могут быть:

- высотомер;
- высокоточные часы;
- гироскопические датчики;
- магнитный компас;
- инерциальная навигационная система;
- бортовые навигационные датчики и средства.

4. Комплексирование с данными других навигационных систем:

- совместное использование в НАП сигналов GPS-ГЛОНАСС;
- совместное использование в НАП сигналов GPS-Galileo-ГЛОНАСС.

При достаточном количестве наблюдаемых навигационных спутников (не менее 6) процедуры RAIM позволяют определить те спутники, информацию с которых нельзя использовать при расчетах навигационных характеристик. При недостаточном количестве наблюдаемых навигационных спутников процедура RAIM не позволяет отбраковать спутники, и поэтому необходимо использовать дополнительно информацию от других бортовых измерительных навигационных систем и средств.

Наземные и космические функциональные дополнения строятся уже с привлечением дополнительных наземных и космических систем и средств. При этом на Земле размещаются специальные контрольно-корректирующие станции, осуществляющие расчет корректирующих поправок для увеличения точности навигации, а также

контроль целостности и повышение надежности навигационных определений (доступности). Передача на борт потребителя полученной дополнительной информации осуществляется либо непосредственно наземными станциями передачи (для GBAS), либо с использованием специальных спутников связи на геостационарных орбитах (для SBAS).

Принципиальное отличие SBAS и GBAS состоит в способах получения и доставки корректирующей информации, а также в зоне действия систем. GBAS — локальная система, функционирующая в зоне действия до 50...100 км, а SBAS — глобальная система с зоной действия до нескольких тысяч километров.

Наземные функциональные дополнения (Ground-based Augmentation Systems — GBAS, (DGPS, LAAS, GRAS))

На рис. 1 представлена обобщенная структурная схема построения наземного функционального дополнения. Наземное дополнение GBAS включает следующие основные элементы:

- контрольно-корректирующую станцию;
- станцию мониторинга дифференциальных поправок;
- станцию передачи дифференциальных поправок и сигналов предупреждения.

Контрольно-корректирующая станция осуществляет контроль целостности навигационных сигналов и расчет дифференциальной корректирующей информации для повышения точности. При возможности для целей контроля целостности могут привлекаться специальные станции контроля, которые контролируют качество излучаемых навигационными спутниками радионавигационных сигналов и навигационного поля и в случае возникновения отказов и неисправностей формируют признак отказа соответствующего спутника.

Станция мониторинга дифференциальных поправок контролирует их качество. Обобщенная информация затем формируется в едином формате и передается на борт по одному из доступных каналов связи (УКВ-связь или другие). К наземным функциональным дополнениям относятся локальные и региональные дифференциальные подсистемы

темы различного назначения — морские, авиационные (LAAS), геодезические, специальные.

Локальные ДПС имеют максимальные дальности действия от контрольно-корректирующей станции (ККС) или передатчика линии передачи данных (ЛПД) — до 50–200 км. ЛДПС обычно включают одну ККС (имеются варианты с несколькими ККС), аппаратуру управления и контроля (в том числе и контроля целостности), а также средства передачи данных.

Для обеспечения высокоточной навигации в самолетах на этапах захода на посадку и непосредственно посадки в США широко разрабатываются и внедряются авиационные LAAS, устанавливаемые на каждом аэродроме (рис. 2). В качестве средства передачи данных на борт самолетов в LAAS обычно используются псевдоспутники, излучающие GPS-подобный сигнал. При этом, помимо передачи дифференциальных поправок и сигналов предупреждения, обеспечивается дополнительный канал измерения дальности относительно наземного пункта.

Расположение GBAS в зоне аэродрома создает условия для расширения ее функций. Предоставляется возможность осуществлять контроль и управление всеми подвижными объектами, находящимися в зоне аэродрома. Для этого аэродромные транспортные средства оборудуются НАП и по радиоканалу передают координаты своего местоположения диспетчеру, где они отображаются на электронной карте. Имея полную картину расположения и движения по аэродрому всех транспортных средств и воздушных судов, диспетчер может осуществлять оперативное управление ими и тем самым повысить безопасность.

Региональные ДПС предназначены для навигационного обеспечения отдельных регионов континента, моря, океана. Диаметр рабочей зоны может составлять от 400...500 до 2000 км и более. РДПС могут иметь в своем составе одну или несколько ККС, а также соответствующие средства передачи корректирующей информации и сигналов целостности. Эта информация вырабатывается на главной станции или ККС.

Космические функциональные дополнения (Space-based Augmentation Systems — SBAS (WAAS, EGNOS, MSAS))

Космические функциональные дополнения (WAAS, EGNOS, MSAS) включают в свой состав наземный и космический сегменты (рис. 3). Основой WAAS, EGNOS, MSAS является сеть широкозонных контрольных станций (ШКС), информация от которых передается на широкозонные главные станции (ШГС) для совместной обработки с целью выработки общих поправок и сигналов целостности. Радиус рабочей зоны ШДПС порядка 5000...6000 км. Выработанные на ШГС сигналы целостности и корректирующие поправки передаются через наземные станции передачи данных (НСПД) на геостационарный КА (ГСА) типа «Инмарсат», «Артемис» или МСАТ для последующей ретрансляции потребителям.

Эти ГСА используются также в качестве дополнительных навигационных точек для дополнительных дальномерных измерений. Основными методами контроля целостности при этом являются методы анализа разностей между измеренными и прогнозируемыми значениями ПД, а также методы, исполь-

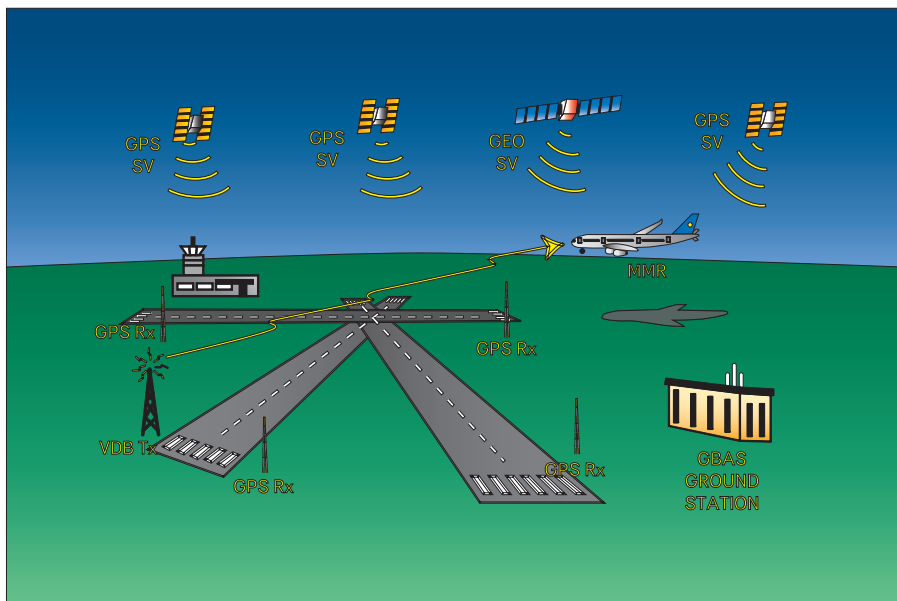


Рис. 2. Структура системы LAAS

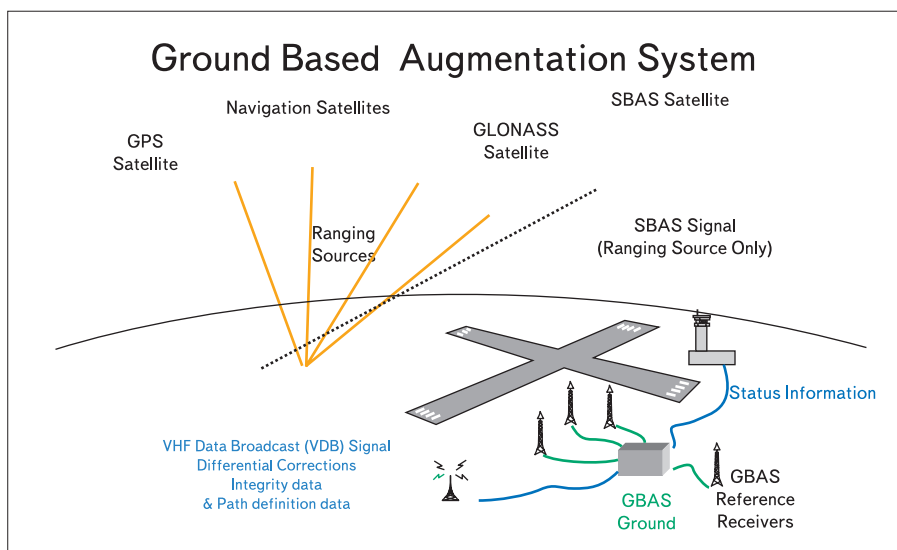


Рис. 3. Состав космических функциональных дополнений (WAAS, EGNOS, MSAS)

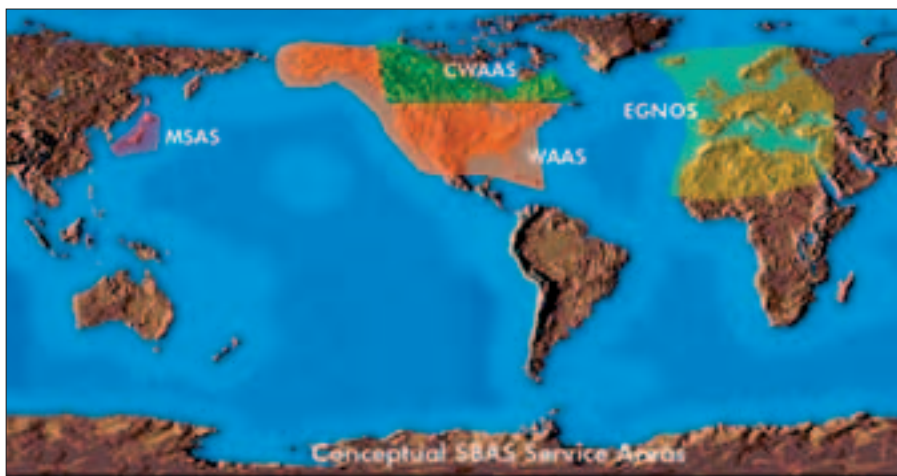


Рис. 4. Рабочие зоны космических функциональных дополнений SBAS

зующие избыточность измерений. Рабочие зоны космических функциональных дополнений показаны на рис. 4. Следует отметить, что все виды функциональных дополнений не противопоставляются друг другу, а взаимно дополняют для обеспечения

выполнения требований всех потребителей по точности, целостности, доступности навигационного обеспечения. В таблицах 1 и 2 показаны сферы применения WAAS и LAAS, а также автономных методов контроля целостности.

Характеристики существующих функциональных дополнений (WAAS, EGNOS, локальные морские, авиационные, геодезические и др. дополнения)

Локальные функциональные дополнения

Основу локальных функциональных дополнений составляют дифференциальные подсистемы, которые решают все задачи, связанные с контролем целостности, повышением точности. Локальные ДПС СРНС имеют максимальные дальности действия от ККС до 50...200 км. ЛДПС чаще всего включают одну контрольно-корректирующую станцию (ККС), аппаратуру управления и контроля (в том числе контроля целостности) и средства передачи данных. К настоящему времени определились три основных класса ЛДПС:

- морские ЛДПС для обеспечения мореплавания в проливных зонах, узких местах и акваториях портов и гаваней в соответствии с требованиями ИМО;
- авиационные ЛДПС для обеспечения захода на посадку и посадки ВС по категориям ИКАО;
- ЛДПС для геодезических, землемерных и других специальных работ.

Морские ЛДПС

Морские ЛДПС предназначены для обеспечения корректирующей информацией и информацией о целостности в основном морских судов и поэтому размещаются вдоль береговой линии материков и по берегам крупных внутренних водоемов. Морские ЛДПС размещены, в частности, в США (практически по всему побережью), по периметру о. Исландия, по побережью Италии и других стран Европы. Двенадцать радиомаяков размещено вдоль побережья Австралии. Отмечается также их размещение в Китае, Индии, Южной Африке, Великобритании, Канаде и в ряде других мест. Отметим, что к середине 1998 г. насчитывалось 187 таких радиомаяков в 28 странах мира.

Точность определения координат (с вероятностью более 0,95) при совместном использовании ГЛОНАСС и GPS составит от 2 до 4,5 м. Надежность обслуживания и доступность составят соответственно более 0,9997 и 0,998 при времени предупреждения об отказе лучше 10 с. Для морских ЛДПС самым экономичным решением является использование в качестве ЛДПС всенаправленных средневолновых радиомаяков, работающих в диапазоне от 283,5 до 325 кГц. При этом применяется манипуляция с минимальным фазовым сдвигом (MSK). Возможная скорость передачи данных — от 25 до 100 бит/с.

В случае передачи поправок для ГЛОНАСС скорость передачи составляет 25 бит/с, при работе с GPS без селективного доступа и с селективным доступом скорости передачи составляют соответственно 50 и 100 бит/с. Такая манипуляция не мешает выполнению основной задачи РМ — определению направления. Всенаправленные средневолновые радиомаяки (РМ) обеспечивают дальность действия до 200 км.

Для помехоустойчивого кодирования используются корректирующие коды Рида-Соломона. Основным недостатком выбранной ЛДПС, тем не менее, является ее подверженность помехам, например, из-за разрядов статического электричества в осадках (дождь, снег и т. п.).

Т а б л и ц а 1. Сферы применения WAAS и LAAS

Требования	Категория I	Категория II	Категория III
Точность определения высоты	4 м	2,5 м	2,5 м
Целостность	$(1... 3,3) \cdot 10^{-7}$	$(1... 3,3) \cdot 10^{-8}$	$(1... 1,5) \cdot 10^{-9}$
Доступность	0,9975	0,9985	0,999
Время обнаружения и доведения сигнала предупреждения	T < 6 с	T < 2 с	T < 1 с
Непрерывность	$1 \cdot 10^{-5}$ в течение 15 с $1 \cdot 10^{-4}$ в течение 150 с	$(1... 1,4) \cdot 10^{-6}$ в течение 15 с $(1... 1,4) \cdot 10^{-5}$ в течение 165 с	$(1... 4) \cdot 10^{-6}$ в течение 30 с

Т а б л и ц а 2. Сферы применения WAAS и LAAS

	Фазы полета	Целостность	Доступность	Точность
Маршрутный полет	Над океаном	RAIM		
	Внутренние трассы			
Заход и посадка	Неточный заход на посадку	WAAS		RAIM
	Точная посадка по категории I	WAAS и LAAS		
	Точная посадка по категории II/III	LAAS		
Наземные операции	Руление			

Т а б л и ц а 3. Основные сообщения ЛДПС СРНС ГЛОНАСС/GPS

Номер типа сообщения GPS	Наименование	Номер типа сообщения ГЛОНАСС
1	Поправки GNSS (для всех «видимых» КА)	31
3	Параметры ККС	32
5	Исправность созвездия	33
6	Нуль-кадр	34 (N=0 или 1)
7	Альманахи радиомаяков	35
9	Подгруппа «быстрых» поправок GNSS (взамен типов 1 или 31)	34 (N>1)
16	Специальное сообщение	36

Корректирующая информация морских ЛДПС передается в соответствии с общепринятым стандартом RTCM SC-104, разработанным первоначально для GPS. Специальным комитетом 104 радиотехнической комиссии по мореплаванию США и поддержанном МАМС (Международной ассоциацией маячных служб). Версия 2.2 этого стандарта создана для того, чтобы учесть и использование дифференциального режима ГЛОНАСС. Последующее изложение основано на этом материале. Формат RTCM SC-104 предусматривает использование 30-битовых слов; из них 24 бита являются информационными, следующие за ними 6 бит — контрольные. Каждое сообщение имеет заголовок из двух слов, следующие за ним слова передаваемых данных специфичны для каждого конкретного типа сообщения. Поправки и неоперативная вспомогательная информация передаются в качестве непрерывного потока сообщений, состоящих из отдельных информационных кадров. Одно со-

общение включает (N+2) слова. Сообщения с данными ГЛОНАСС сгруппированы в блок из 7 типов (табл. 3).

Формат и содержание сообщений о поправках ГЛОНАСС идентичны формату и содержанию соответствующих сообщений GPS, однако имеются некоторые отличия, связанные с несколько иной структурой координат и временной шкалы ГЛОНАСС, а также с содержанием информационных кадров навигационного сообщения ГЛОНАСС.

Имеются также отличия в заголовках сообщений. Сообщение 31 (N>1) содержит корректирующие поправки для всех «видимых» КА. В отличие от сообщения 31 сообщение 34 содержит поправки лишь для подгруппы из этих «видимых» КА, общим числом не более 9. Сообщение 32 содержит информацию о координатах ККС в системе ПЗ-90. Формат и содержание этого сообщения идентичны сообщению 3 для GPS, но координаты в сообщении 3 представлены

в системе WGS-84. Сообщение 34 ($T=0$ или 1) используется для вспомогательных целей (обеспечения непрерывности передачи); например, когда ККС не готова послать другую информацию, для синхронизации в некоторых специфических случаях и т.д. Сообщение 35 предусмотрено для радиомаяков, передающих поправки для ГЛОНАСС, и содержит информацию о местонахождении, частоте несущей и зоне действия радиомаяка. Оно используется для того, чтобы облегчить восприятие сигнала радиомаяка потребителем.

Координаты РМ передаются в системе координат ПЗ-90. Каждый РМ передает также информацию о двух или трех близлежащих РМ сети. Зона действия РМ характеризуется расстоянием от РМ, на котором отношение сигнал/помеха в полосе сигнала превышает 7 дБ в 99,9 процентах времени данного сезона. РМ идентифицируется в соответствии с положениями МАМС.

Сообщение типа 36 идентично сообщению типа 16, но информация о безопасности навигации будет передаваться как на русском, так и на английском языках. Частота передачи сообщений различных типов указана в таблице 4.

В случае кратковременного отсутствия поправок для любой системы и информации об отказе ККС и РМ будет передаваться сообщение типа 6 (34) ($N<2$) или сообщение 16 (36) с указанием вида отказа в заголовке. Одновременно информация об отказе РМ и ККС будет передаваться близлежащим РМ посредством сообщений типа 7 (35). В результате время между обнаружением отказа и передачей предупреждения о нем не превысит 10 с. Использование дифференциального режима работы СНС позволяет также успешно решать следующие специальные навигационные задачи:

- обеспечение высокоточного судовождения на внутренних водных путях (реках, озерах и водохранилищах);
- рыбный промысел в прибрежных водах, узких местах и в районах со сложной навигационной обстановкой;
- высокоточный промер глубин в прибрежных водах и узких местах;
- точное выставление и контроль за местоположением плавучих средств навигационного ограждения как на море, так и на реках и в узких местах;
- прокладка кабелей и трубопроводов как в прибрежных водах, так и в открытом море;
- геодезические и другие научные исследования в любых районах мира;
- обеспечение добычи полезных ископаемых и проведения необходимых изыскательских работ.

Дифференциальные сети на базе наземных радиомаяков

Первоначально дифференциальные сети на базе береговых радиомаяков создавались для обеспечения передачи дифференциальных поправок морским и речным судам с целью повышения безопасности плавания в портах, в районах прибрежных навигационных опасностей. Морские ДПС используют в качестве линий передачи данных всенаправленные средневолновые радиомаяки (283,5...325 кГц) с дальностью действия 200...300 км. При этом применяется манипуляция с минимальным фазовым сдвигом (MSK). Возможная скорость передачи данных составляет от 25 до 100 бит/сек.

Радиомаяки размещены практически по всему побережью США, по периметру о. Исландия, по побе-

Т а б л и ц а 4. Частота передачи сообщений ЛДПС ГЛОНАСС/GPS

Номер сообщения	Частота
9(1)	Передается настолько часто, насколько возможно; примерно каждые 15–20 с
3	Дважды в час (по истечении каждой 15-й и 45-й минуты)
5	Передается в 5-ю минуту каждого часа и через каждые 15 мин после
6	Передается по мере необходимости
7	Передается в 7-ю минуту каждого часа и каждые 15 мин после
16	Передается в случае необходимости
34/(31)	Передается каждые 50–60 с
32	Передается дважды в час (в 16-ю и 45-ю мин каждого часа)
33	Передается в 6-ю минуту каждого часа и затем каждые 15 мин
34	$N=0$ или 1. Передается по мере необходимости
35	Передается в 8-ю минуту каждого часа
36	Передается по мере необходимости



Рис. 5. Зона покрытия системы наземных радиомаяков

режье Италии. 12 радиомаяков размещены вдоль побережья Австралии. Есть они и в Китае, Индии, Южной Африке, Англии, Канаде и других странах. К середине 1998 года насчитывалось 187 маяков в 28 странах мира. В России в настоящее время существует всего 3 радиомаяка.

Вследствие своей всенаправленности, радиомаяки обеспечивают высокоточными дифференциальными поправками не только акватории морей, но и береговые территории. Это позволило в дальнейшем, в частности, в США, на их базе создать и развивать Национальную DGPS для обеспечения и наземных потребителей, в первую очередь для железных дорог. Сигналы маяков Соединенных Штатов охватывают оба побережья, Миссисипи и Великие озера. Точность местоопределений с использованием коррекций от радиомаяков изменяется в зависимости от специфики маяка (типа оборудования, скорости передачи данных) и обычно может быть достигнута от 1 до 10 м. Особенностью использования данных от радиомаяков является их общедоступность и бесплатность. Отсутствие необходимости авторизации пользователя часто является немаловажным фактором при выборе того или иного решения. Зоны покрытия национальной дифференциальной системы США для восточного побережья показана на рис. 5.

Дифференциальные данные в подобных сетях передаются в стандарте для морских потребителей RTCM. Формат передачи данных RTCM SC-104 был разработан специальным комитетом 104 при радиотехнической комиссии морских служб (RTCM SC-104). Стандарт RTCM содержит сообщения нескольких типов. В основном сообщении 1-го типа содержатся поправки к псевдодальностям по каждому спутнику, привязанные к определенному моменту времени. Состав передаваемой информации в формате RTCM-104 представлен в таблице 8.

Авиационные ЛДПС

К настоящему времени разработано несколько типов авиационных ЛДПС посадки (спутниковых систем посадки). Эти системы отличаются несколькими достоинствами, среди которых можно выделить:

- сравнительно небольшой состав оборудования позволяет снизить издержки при улучшенных операциях в сложных метеоусловиях;
- позволяют в условиях 1-й и потенциально более сложных категорий обеспечить возможность работы для начальных участков всех ВПП со стороны захода на посадку, располагающихся в радиусе до 55 км, что делает эту систему экономически более эффективной, чем другие средства, которые предназначаются для одной ВПП;

- позволяют оборудовать местные авиалинии;
- отличаются гибкостью, позволяющей реализовать траектории захода с переменной геометрией, минимизирующие время полета и обеспечивающие борьбу с помехами;
- в системах реализуются современные принципы проектирования, обеспечивающие контроль состояния аппаратуры и ускорение ремонтных работ.

В качестве одного из примеров авиационной ЛДПС можно привести системы D920/D930 фирмы DASA (ФРГ), работающие по GPS. Аппаратура D920 сертифицирована в соответствии со специальной категорией I, система D930 в состоянии удовлетворить требованиям 1-й и 2-й категорий ИКАО. Радиус действия этих систем составляет до 37 км. Система D920 включает ККС с монитором СРНС, УКВ ЛПД с монитором (стандарт RTCA/DO-217), а также общий монитор для контроля и управления. Система имеет отказоустойчивую конструкцию и сертифицирована для критических ситуаций по соответствующим стандартам. Программное обеспечение сертифицировано по требованиям RTCA/DO-178B.

Для того чтобы удовлетворить жестким требованиям посадки самолетов, ЛДПС имеет в своем составе монитор целостности со следующими функциями:

- обнаружение и исключение аномальных сигналов и ошибок, влияющих на измерительные каналы;
- аттестация дифференциальных ошибок определения дальности потребителя посредством сравнения некоррелированных показаний приемников;
- обнаружение и исключение перескоков фазы при слежении за фазой несущей;
- контроль передаваемых сообщений перед и после их излучения в эфир.

Общие характеристики системы D920 следующие: частота выдачи поправок 1...4 Гц, целостность $1...3 \cdot 10^{-8}$, доступность 0,98, непрерывность $1...3,8 \cdot 10^{-5}$, точность (СКО) лучше 1,1 м. Имеется встроенный контроль, осуществляется автономное функционирование с теленаблюдением, а также взаимодействие со службами УВД.

Другими яркими примерами являются системы SLS-1000 и SLS-2000, разработанные фирмами Honeywell и Pelorus. Состав оборудования обеих систем аналогичен составу D920/D930. Система SLS-1000 имеет средства самопроверки, которые при возникновении отказа оповещают об этом потребителей (операторов УВД и самолеты в зоне действия). Система SLS-2000 представляет собой отказоустойчивую конструкцию, которая продолжает выполнять свои функции при отказах отдельных блоков в то время, когда могут осуществляться мероприятия по ремонту техники. В таблице 9 приведены требуемые и реализуемые характеристики этих систем.

Существуют также разработки авиационных ЛДПС для посадки самолетов, характеристики которой должны удовлетворять требованиям посадки по II-й и даже по III-й категории. Эта ЛДПС разработки Стэнфордского университета использует кодовые и фазовые измерения сигналов НКА GPS и сигналов псевдоспутников (псевдолитов — ПЛ), размещаемых перед торцом ВПП (для каждого направления захода на посадку). Кодовые и фазовые измерения

Т а б л и ц а 5. Общий формат кадра

Заголовок		Тело кадра										
Строка 1		Строка 2		Строка 3		Строка 4		Строка 5		...	Строка N+2	
24 бит	6 бит	24 бит	6 бит	24 бит	6 бит	24 бит	6 бит	24 бит	6 бит	...	24 бит	6 бит

Т а б л и ц а 6. Структура заголовка

Строка	Состав	Кол-во бит	Масштабный коэффициент и единицы измерения	Диапазон
1	Преамбула	8	-	-
	Тип кадра	6	1	1-64
	Индекс опорной станции	10	1	0-1023
	Четность	6	-	-
2	Модифицированный Z-счет	13	0,6 с	0-3599,4 с
	Номер последовательности	3	1	0-7
	Число строк данных(N)	5	1 строка	0-31 строк
	Состояние опорной станции	3	-	8 состояний
	Четность	6	-	-

Т а б л и ц а 7. Формат передачи поправок по всем спутникам

Заголовок	Информация по спутнику 1	Информация по спутнику 2	...	Информация по спутнику NS	Заполнение

Т а б л и ц а 8. Структура информационного блока дифференциальной поправки

Параметр	Кол-во бит	Масшт. коэф.	Диапазон
Масштабный коэффициент	1	-	2 состояния
Ошибка дифференциальной дальности потребителя	2	-	4 состояния
Номер спутника в системе GPS	5	1	1-32
1, 9 тип: Поправка псевдодальности (PRC) 2 тип: Приращение поправки псевдодальности (ΔPRC)	16	0,02 или 0,32 м	$\pm 655,34$ или $\pm 10485,44$ м
1, 9 тип: Скорость изменения поправки псевдодальности (RRC) 2 тип: Приращение скорости изменения поправки псевдодальности(ΔRRC)	8	0,002 или 0,032 м/с	$\pm 0,254$ или $\pm 4,064$ м/с
Возраст данных	8	-	0-256

Т а б л и ц а 9. Требования к точному заходу на посадку и их реализация

Параметры	Стандарт RTCA/DO-217	SLS-1000, SLS-2000
Точность (СКО) определения псевдодальности, м	1,1	менее 0,9
Целостность	$3 \cdot 10^{-8}$ /заход	$1 \cdot 10^{-8}$ /заход
Непрерывность	$3,8 \cdot 10^{-5}$ /заход	$1,15 \cdot 10^{-7}$ /заход
Эксплуатационная доступность, %	98	99
Время задержки сигнала оповещения, с	< 3,0	< 1,0
Время захвата, с	300	75
Критичность программного обеспечения	RTCA/DO-178B уровень В	RTCA/DO-178B уровень В
Дальность действия ЛПД, км	> 37	37...55
Периодичность сигналов дифференциальных коррекций, с	3,0	0,5
Вид модуляции	фазовая манипуляция D8PSK согласно RTCA/DO-217, приложение F, изменение 1	фазовая манипуляция D8PSK согласно RTCA/DO-217, приложение F, изменение 1
Вид сообщения	RTCA/DO-217, приложение А, тип 1	RTCA/DO-217, приложение А, тип 1 и 4

наземной контрольной станции передаются на борт в реальном времени.

Использование на борту собственных кодовых и фазовых измерений НКА и псевдоспутников совместно с дополнительными измерениями наземной ККС позволяет успешно решить проблему многозначности фазовых отсчетов и реализовать их потенциально более высокую точность. Позиция ИКАО относительно формата сообщений и радиоканала для авиационных ЛДПС нашла отражение в SARPS по GNSS 1999 г., в котором учитывается стандарт RTCA/DO-217 по минимальным характеристикам авиационных систем, подготовленный Радиотехнической комиссией по авиации США. В соответствии с этим стандартом разработан ряд конкретных и описанных выше систем, которые прошли испытания. Их предполагается использовать для обеспечения полетов гражданской авиации. Соответствующая ЛПД использует УКВ диапазон частот 112...118 МГц. Формат общего сообщения ЛПД включает: служебную последовательность; информационный массив; корректирующую кодовую последовательность (FEC — Forward Error Correction) и вспомогательные символы.

Передаваемое частное сообщение о поправках содержит, например: идентификатор блока сообщения — 8 бит; идентификатор ККС — 24 бита; резервное слово — 2 бита; тип сообщения — 6 бит; длину сообщения — 8 бит; модифицированный Z-отсчет — 13 бит; ошибку ускорения — 3 бита; номера КА — 6 бит; поправки псевдодальностей — 16 бит на 1 ПД; возраст данных — 8 бит; поправки псевдоскоростей — 12 бит на 1 ПС; ошибки дифференциальных дальностей пользователя — 6 бит на 1 дальность; кодовую корректирующую группу — 24 бита. При двенадцати КА общий размер такого сообщения составит 664 бита.

Используется относительная фазовая модуляция несущей со сдвигом по фазе на $D/4$ (всего 8 положений). При этом один символ передаваемой информации представляется одним сдвигом фазы, чему соответствует двоичное число из трех бит (код Грея). Например, 001 соответствует 1 и фазовому сдвигу $D/4$ и т. д. Служебная последовательность (85 бит) позволяет бортовому приемнику правильно демодулировать сообщение. В передатчике она способствует стабилизации уровня мощности, синхронизации, содержит резервный символ, информацию о длине сообщения и корректирующую группу служебной последовательности.

Служебная последовательность защищается укороченным кодом Хэмминга, способным корректировать ошибку одного бита и обнаруживать 75 из 300 возможных парных ошибок. Информационный массив (общий объем до 1776 бит) защищается укороченным кодом Рида-Соломона (225, 249 бит). Этот код способен исправлять до трех ошибочных символов. Он формируется из 8-битовых слов с помощью кодирующей последовательности (FEC). После кодирования сообщение подвергается скремблированию.

Все общее сообщение передается внутри интервала длительностью 500 мс. Восемь таких интервалов составляют один подкадр общего временного календаря ТОМА. Скорость передачи данных 2400 бит/с. Система, соответствующая специальной категории I (SCAT-1),

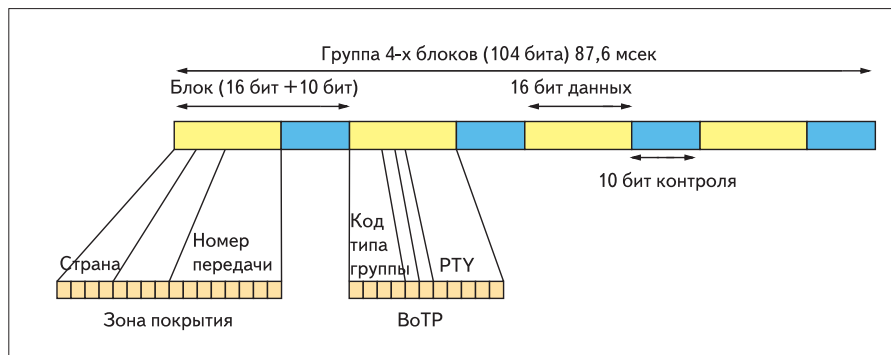


Рис. 6. Структура передаваемых данных в RDS

внутри одного подкадра не может использовать более двух интервалов. Для обеспечения захода на посадку по категориям I, II и III может использоваться и более двух интервалов в зависимости от требований, предъявляемых этими системами. Для создания ЛПД применительно к ЛДПС посадки по III категории рассматриваются альтернативные варианты радиоканалов. Считается, что дифференциальные поправки для всех «видимых» КА должны передаваться с частотой 1 Гц, сигналы целостности и положительной идентификации — с частотой 2 Гц и данные о состоянии ВПП — с частотой 1/20 Гц. При этом, однако, общий формат сообщения о поправках, приведенный выше, остается неизменным. Увеличивается лишь на 8 бит корректирующая кодовая группа (до 32 бит). Предполагается также, что сообщение о целостности имеет длину до 272 бит, а сообщение о состоянии ВПП — до 1000 бит.

В то же время предполагается, что возможности ЛПД должны быть таковыми, чтобы учитывать любые изменения в формате, например, за счет включения дифференциальных сообщений ГЛОНАСС; поправок фазы несущей; формата данных DGNSS-2 (то есть DGNSS еще более далекого будущего). Помимо УКВ-диапазона 108...118 МГц рассматривался и диапазон MLS 5000...5250 МГц, а также модифицированный С-диапазон.

Отмечается, что использование УКВ-диапазона, как правило, не требует размещения на самолете новых антенных устройств; однако оно требует, по сравнению с диапазоном С и диапазоном MLS, обеспечения больших отношений сигнал/помеха. Рассмотрение различных вариантов, по-видимому, будет продолжено. Свидетельством этого, в частности, является выход в свет новых нормативных документов RTCA/DO-245 (стандарт на ЛДПС посадки по категориям I, II, IIIA, IIIB и по взаимодействию с GPS/WAAS) и RTCA/DO-246 (интерфейсный контрольный документ, определяющий взаимоотношения ЛДПС посадки и бортового оборудования). Устанавливает характеристики 4-х сигналов: GNSS для ВС, GNSS для наземной станции, ЛПД и дополнительного сигнала при изменении дальности).

Дифференциальные сети с передачей поправок по каналам УКВ ЧМ радиостанций

Одним из распространенных методов передачи дифференциальных коррекций является использование системы передачи данных по радиосигналам станций FM-вещания

вместе со звуковым сигналом (Radio Data System — RDS). RDS — стандарт, разработанный в Европе для передачи данных по частотам радио ЧМ. Система RDS применяется в Европе, США, ЮАР. При этом система, принятая в США (RBDS — Radio Broadcast Data System), отличается от европейской, хотя частично совместима. Начато развертывание сетей RDS в Австралии, Южной Корее и Китае. В Японии применяется несколько другая система радиоданных, разработанная японцами специально для внутреннего применения, поскольку в RDS предусмотрен только латинский алфавит.

Предназначалась эта система в первую очередь для передачи дополнительной, вспомогательной информации радиослушателям-автомобилистам. Однако в дальнейшем имеющийся цифровой канал стали использовать и для других целей, в том числе для радиопейджинга. RDS работает на основе уплотнения радиовещательного сигнала в диапазоне 88...108 МГц с пилот-тоном и организации канала передачи радиоданных. Система RDS, работающая на основе европейского стандарта Cenelec EN50067 и в соответствии с техническими условиями 3244 EBU, представляет собой канал передачи данных со скоростью 1187,5 бит/с, сформированный на поднесущей 57 кГц (3-я гармоника пилот-тона).

Стандартом предусмотрена передача нескольких видов информации: названия радиопрограммы; идентификационного кода, содержащего данные о принадлежности и расположении радиостанции; списка альтернативных частот радиостанции, работающей в сети с двумя и более передатчиками; типа передаваемой в настоящий момент радиопрограммы (новости, спорт, сводка погоды, джаз, поп-музыка, рок и т. п.) и др. Наряду с этим обеспечивается передача радиотекста (RT), данных (TDC), технологических данных и информации (IH), а также радиопейджинга (RP). Кроме того, стандарт предусматривает не менее 40% резервных групп (всего их 16) и подгрупп под общим названием Open Data Application, на основе которых пользователи могут сами создавать различные службы и находить другие способы применения. Структура передаваемых данных в RDS представлена на рис. 6.

Данные организованы в группы, существует 16 различных групп. Каждая группа состоит из 4-х блоков. Каждый блок содержит 16 бит данных и 10 бит контроля, позволяющего приемнику

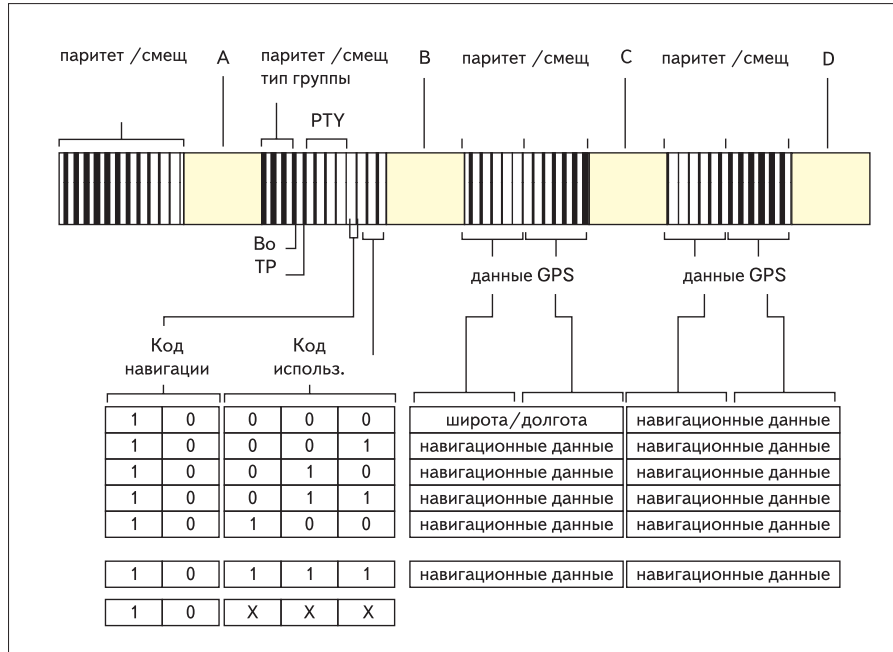


Рис. 7. Схема группы данных 11A

Т а б л и ц а 10. Содержание полей кода PI

Код стран (4 бита)	Зона передачи (4 бита)	Номер программы (8 бит)
0	L=локальная	От 1 до 255
1	I=международная	
2	N=национальная	
3	S=межрегиональная	
4	Андорра	
5	Швейцария	
6	Италия	
7	Бельгия	
8	Люксембург	
9		
A	Монако	
B	Великобритания	
C	Германия	
D	Испания	
E	Франция	
F	R12=региональная	

автоматически устранять ошибки передачи. Таким образом, каждая группа содержит 104 бита и передается за 87,6 мс. Частота передачи получается делением на 48 частоты несущей сигнала (57 кГц). В каждой группе первый блок содержит всегда код PI. Второй блок содержит тип группы и версию: коды TP и PTY. Эти три кода обязательны для любой группы, для обеспечения быстрого поиска нужной группы. Передаваемая информация содержится в последних двух блоках. Код PI содержит три поля. Содержание полей показано в таблице 10.

Тип группы состоит из 4-х бит и одного бита версии. Структура типа представлена в таблице 11.

Код PTY состоит из 5 бит и определяет типы передачи. Структура кода PTY представлена в таблице 12.

Группы RDS передаются с разной частотой. Данные о частоте передачи групп представлены в таблице 13.

Дифференциальные поправки передаются в группе данных 11A. Схема группы представлена на рис. 7.

Первый блок содержит код PI, второй блок содержит код типа группы, коды TP, PTY, а также тип передаваемых навигационных данных. Типы передаваемых данных представлены в таблице 14.

Информация навигационных данных типа 0 расположена в группе в блоках C и D и распределена следующим образом:

Блок C	Блок D
??????	iiiiiiiiii hhh zzzzzzzzzzzz

где

? – пустые биты (6 бит)

i – биты номера базовой станции (10 бит)

h – биты состояния базовой станции (3 бита)

Т а б л и ц а 11. Структура типа

Тип группы (4 бита)	Версия (1 бит)		
0	Базовая информация		
1	Расписание передач		
2	Радиотекст		
3	Информация о сетях	0	A
4	Дата и время	1	B
5			
6			
7-14	Прочая информация		
15	Сокращенная базовая информация		

Т а б л и ц а 12. Структура кода PTY

Код PTY (5 бит)	Информация
0	информация
1	новости
2	журнал
3	спорт
4	педагогические передачи
5	детские передачи
6	юношеские передачи
7	религиозные
8	театральные, литературные
9	документальные
10	рок и поп-музыка
11	легкая музыка
12	классическая музыка
13	джаз
14	фольклорная музыка
15	варьете
16-30	предупреждения (катастрофы, землетрясения...)
31	-

Т а б л и ц а 13. Данные о частоте передачи групп

Приложения	Тип группы	Частота (сек)
Код идентификации программы (PI)	Все	11
Название радиостанции (PS)	0A, 0B	1
Тип передачи (PTY)	все	11
Тип передачи для автомобилистов (TP)	0A	4
Код дополнительных частот (AF)	0A, 0B, 15B	4
Код дорожных новостей (TA)	0A, 0B, 15B	4
Код идентификации декодера (DI)	15B	1
Код музыка/речь (M/S)	0A, 0B, 15B	0.2
Код расписания передач (PIN)	1A, 1B	
Сообщение радиотекста (RT)	2A, 2B	

Т а б л и ц а 14. Типы передаваемых данных

Тип данных	Передаваемая информация
0	Z-счет, номер и состояние базовой станции
1	Псевдодальности и псевдоскорости по спутникам
2	Псевдодальности и IOD
3	Координаты базовой станции
4-0	-
4-1	-
4-2	-
4-3	Специальное сообщение
5	-
6	IOD спутников
7	-

z – биты Z-счета (13 бит)

Информация по псевдодальности и псевдоскорости располагается в блоках В, С и D:

Блок В			Блок С				Блок D			
.....	001	uu	rrrrrrrrrrrrrrrrrr	ppppr	o	s	?	ddddd		

где
 u — UDRE — оценка дифференциальной точности потребителя(2 бита);
 p — номер спутника в системе GPS 0.. 31 (5 бит);
 r — PRC (мм) псевдодальность (без учета масштабирующего фактора) (16 бит);
 d — RRC (мм/с) псевдоскорость (без учета масштабирующего фактора)(8 бит);
 s — масштабный фактор (1 бит);
 0 — PRC•20, RRC•2;
 1 — PRC•320, RRC•32;
 o — дополнительная базовая минута(GPS-время) (1 бит)

Информация в группе типа 2 размещена в блоках В, С, D следующим образом:

Блок В			Блок С				Блок D			
.....	010	uu	rrrrrrrrrrrrrrrrrr	ppppr	0	s	?	ddddd		

где
 u — UDRE — оценка дифференциальной точности потребителя (2 бита);
 p — номер спутника в системе GPS 0.. 31 (5 бит);
 r — PRC (мм) псевдодальность (без учета масштабирующего фактора) (16 бит);
 d — IOD старение данных спутника (8 бит);
 s — масштабный фактор (1 бит);
 0 - PRC *20
 1 - PRC*320
 ? – неиспользуемые биты.

Группа типа 3 содержит информацию о координатах базовой станции, данные размещены следующим образом:

Блок В		Блок С				Блок D			
.....	011	pp	hhhhhhhhhhhhhh	iiiiiiii	qqqq	nnnnnnnn	oooooo		

где
 p — передаваемая координата (2 бита);
 0 – X координата;
 1 – Y координата;
 2 – Z координата;
 h — старшие биты координаты (16 бит);
 i — младшие биты координаты (16 бит).

Группа типа 5 содержит информацию о возрасте данных по спутникам:

Блок В			Блок С				Блок D			
.....	011	pp	ppr	iiiiiii	qqqq	nnnnnnn	oooooo			

где
 p — номер спутника в системе GPS (5 бит);
 I — IOD возраст данных спутника (8 бит);
 p — номер спутника в системе GPS (5 бит);

i — IOD возраст данных спутника (8 бит);
 i — IOD предыдущее значение возраста данных спутника (8 бит).

В настоящее время зоны покрытия радиовещательных станций, передающих дифференциальные коррекции, ежегодно увеличиваются. Дальность действия одной вещательной станции не превышает 70..100 км. Точность местоопределения объектов, обеспечиваемая RDS, специально квантуется от уровня оплаты и составляет от одного дециметров до 10 метров. Оплата услуг осуществляется путем подписки, а величина оплаты зависит от уровня предоставляемой точности и продолжительности

Таблица 15. Ориентировочная стоимость подписки

Продолжительность подписки	Уровень точности		
	1 м	5 м	10 м
12 месяцев	\$600	\$250	\$75
36 месяцев	\$1300	\$550	\$175
60 месяцев	\$2000	\$800	\$250

подписки. Примером подобных систем являются системы фирм Differential Correction Inc. (DCI) (США) и Focus Fm (Великобритания). Ориентировочная стоимость подписки приведена в таблице 15.

Зона покрытия системы Focus Fm показана на рис. 8.



Рис. 8. Зона охвата сети Focus Fm

Аналогичная система развернута на территории Швейцарии. Система функционирует много лет и контролируется Топографической службой Швейцарии. Она покрывает практически всю Швейцарию на конец 1999г. Несколько стран в Европе и Америке имеют аналогичные системы. Эта система платная и представляет уточнение данных до двух уровней точности между 1 и 5м приблизительно.

Геодезические и специальные ЛДПС

Важный, распространенный и весьма перспективный класс ЛДПС составляют системы геодезического обеспечения с дальностью не более 50 км и сантиметровой-дециметровой точностью. Как правило, их использование допускает серьезную обработку измерений после того, как эти измерения проведены. Кроме того, они почти в обязательном порядке реализуют алгоритмы слежения за фазой несущей частоты сигнала. В то же время требования непрерывности, доступности и целостности для таких систем могут быть существенно ослаблены. Имеются примеры построения подобных геодезических сетей. Уже получены результаты использования первой дифференциальной сети в Германии, которая расположена на юге Нижней Саксонии. Она имеет 5 опорных станций: в Ганновере, Брауншвейге, Геттингене, Алфельде и Клаустхал-Целлерфельде (главная станция). Корректирующие поправки рассчитываются на главной станции и передаются в соответствии со стандартом RTCM SC-104 v. 2.1. Используется метод дифференциальной коррекции в реальном времени. Реализуется точность привязки от нескольких сантиметров до нескольких миллиметров.

Развернута сеть в Нидерландах, состоящая из пяти опорных и одной главной станции, объединенных каналами передачи данных. Определение места потребитель осуществляет при использовании коррекций от виртуальной станции, месторасположение которой выбирается по его выбору. Кроме того, имеются геодезические ЛДПС во Франции, Дании, Швеции. Системы широко используются в картографировании, землеустройстве, проведении строительных и изыскательных работ. Имеются и весьма специфические применения ЛДПС СРНС, например, для контроля за перемещением автомашин инкассаторов банка, такси в Гетеборге и т. п. Ъ

Продолжение следует