

Определение местоположения на основе глобальных навигационных спутниковых систем: способы повышения точности

В.М. КИРСАНОВ,

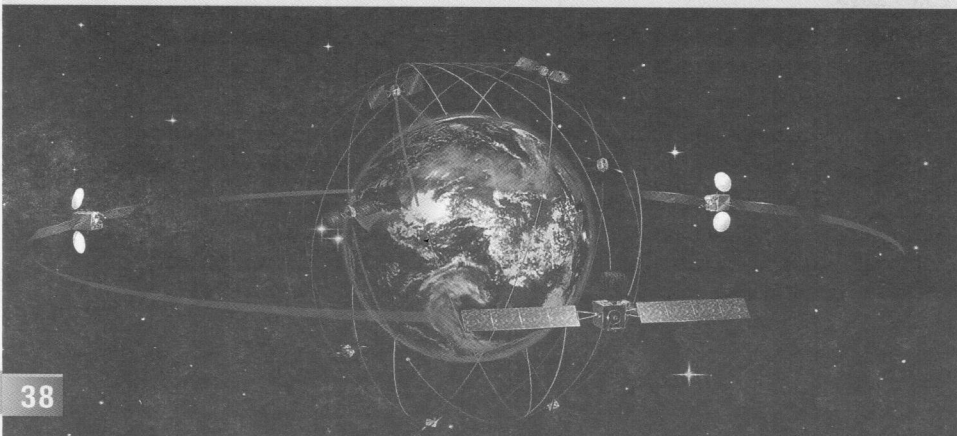
ведущий инженер навигационно-информационного центра
ОАО «АГАТ-системы управления» – управляющая компания
холдинга «Геоинформационные системы управления»

Мы продолжаем знакомить читателей с возможностями, которые предоставляют современные навигационные технологии. В таких сферах, как геодезия, авиация, железнодорожный транспорт, точное земледелие, необходима более высокая точность, чем та, которая может быть получена при использовании стандартных сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Для решения задачи повышения точности в большинстве технологически развитых стран внедрены системы дифференциальной коррекции. Каковы же методы и средства, применяемые для высокоточной навигации?

Одним из способов улучшения точности определения местоположения с использованием ГНСС являются дифференциальные поправки. Способ совсем не новый. В навигации традиционно списывали накопленную ошибку в точках с известными координатами. Собственно дифференциальные поправки начали применять еще в навигационных системах наземного базирования. Идея довольно проста: в точке с точно известными координатами устанавливается антенна навигационного приемника и разность истинных и измеренных значений, являющаяся в большей степени систематической погрешностью, передается потребителю.

Измеряемыми параметрами приемника являются псевдодальности от антенны приемника до спутников, определяемые по задержке радиосигнала. Координаты антенны приемника вычисляются по координатам четырех и более спутников в момент излучения сигнала и измеренных до них псевдодальностях.

На ошибку местоопределения влияют, во-первых, условия распространения радиоволн. Волне, пробиваясь из открытого космоса на Землю, приходится проходить через разные слои атмосферы, где она преломляется. Во-вторых, точность определения напрямую связана с точностью эфемерид. Эфемериды – это координаты радионавигационных спутников Земли, которые передаются в составе сообщений о местонахождении спутника. Они загружаются на спутник с наземных контрольных станций примерно раз в сутки. Кроме начальных погрешностей они еще изменяются во времени. К факторам, влияющим на ошибку, можно отнести уход бортовых часов спутника. Ошибки по разным спутникам между собой мало связаны и разные по величине – сигналы от



различных навигационных космических аппаратов идут через разные части небосклона и эфемериды у всех индивидуальные. Тогда, если передавать потребителю только разность координат, нужно иметь гарантию, что условия на контрольно-корректирующей станции (ККС), формирующей поправки, и у потребителя абсолютно одинаковые – и там и там используется одинаковый набор спутников (называемый рабочим созвездием) и расчеты координат произведены с использованием одних и тех же эфемерид. В реальных условиях, особенно на подвижных объектах, такое практически недостижимо. А применяя такие поправки для другого созвездия, можно даже получить ухудшение точности. Поэтому лучше передавать поправки к «первоисточнику» расчетов – к псевдодальностям. ККС решает обратную задачу – по точно известным своим координатам и считая точными координаты спутников, рассчитанные по эфемеридам, вычисляет дальность до спутника. Сравнив ее с полученной измерением сигнала, считает ошибку дальности. Оценивая, как эта ошибка себя ведет в течение сравнительно долгого времени, дополнительно еще вычисляет скорость изменения ошибки. Для того чтобы узнать, на какой момент времени рассчитана ошибка, особенно если поправки передаются редко (раз в несколько секунд), в спутниковой системе есть своя система счета времени, и с каждой поправкой потребителю передается значение спутниковых часов (младшая часть), на которое была рассчитана эта поправка. К тому же у эфемерид есть циклический счетчик, который увеличивается каждый раз, когда происходит загрузка эфемерид на спутник. Таким образом, можно гарантировать, что и ККС, и потребитель одинаково

понимают, на какой момент времени действительна поправка и для каких условий. В этом случае у потребителя шире возможности в выборе рабочего созвездия в соответствии со своими условиями работы. Однако у потребителя поправки должны быть на все используемые спутники. Иначе даже одна псевдодальность без поправки может испортить общую картину. Поправки будут тем точнее, чем ближе потребитель находится к ККС. Один из выходов – передавать потребителю координаты ККС, и он, зная удаленность от нее, будет принимать решение, насколько верить этим поправкам. Другое, более сложное решение – сеть станций. При этом можно, обрабатывая данные от всех станций в сети, создавать модель распределения ошибок по поверхности участка Земли и более точно прогнозировать поправки для любой точки зоны действия сети. Но в этом случае требуется установка двусторонней связи потребителя с сетью (или самостоятельная обработка потребителем огромного объема информации). Стандарты на форматы данных и другие детали технической реализации разрабатывает Специальный комитет морской радиотехнической комиссии RTCM SC-104 (Radio Technical Commission for Maritime Services, Special Committee 104). Несмотря на «морское» название комиссии, стандарты рассчитаны и на наземных, и на воздушных потребителей. Хотя в авиации более распространены стандарты Радиотехнической комиссии авиации RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics).

Для повышения точности определения местоположения на земной поверхности или в околоземном пространстве используются функциональные дополнения к ГНСС: системы дифференциальной коррекции. Они

обеспечивают некоторую территорию информацией о дифференциальных поправках. Спутниковые системы коррекции обычно используют геостационарные спутники и поддерживают увеличение точности сигнала за счет использования спутниковой трансляции сообщений. Такие системы обычно состоят из нескольких наземных станций, координаты расположения которых известны с высокой степенью точности.

Существующая классификация функциональных дополнений связана с признаком «зона обслуживания». По этому признаку системы делятся на три типа: внутреннего функционирования, локальные, сетевые (региональные, широкозонные, глобальные).

Системы внутреннего функционирования могут использоваться только для контроля целостности, так как дифференциальные системы принципиально требуют внешнего источника информации (измерений другой станции).

Внутренний контроль целостности может осуществляться как на основе только внутренней (автономный контроль целостности в приемнике (RAIM)), так и дополнительной измерительной информации (от различных бортовых навигационных датчиков).

Локальные системы подразумевают расположение контрольной аппаратуры в одной точке. Обычно локальные системы контроля целостности и дифференциальных поправок объединены. Зоной действия локальных ДПС (ЛДПС) является территория с радиусом до 200–300 км относительно точки установки опорной станции.

Для локальных систем характерны:

- использование быстрых дифференциальных поправок;

- короткое время передачи «сигнала тревоги»;
- высокая точность решения навигационной задачи в дифференциальном режиме в локальной области.

Существующие ЛДПС могут быть условно разделены по уровню точности на две группы:

обеспечивающие точность определения координат около 1–3 м;

обеспечивающие точность определения координат около 1–30 см.

Системы, отнесенные к первой группе, могут обслуживать территорию, не превышающую 300 км относительно места установки опорной станции.

Системы, отнесенные ко второй группе, могут обслуживать территорию, не превышающую 50 км относительно места установки опорной станции.

В настоящее время потребителями ККИ, формируемой с точностью 1–3 м, являются авиационные транспортные средства при совершении посадки, а также морские и речные суда при плавании в районах порта, узостях, по фарватеру и т. д.

Потребителями ККИ, формируемой с точностью 1–30 см, являются геодезические, топографические и кадастровые организации, а также железнодорожные диспетчерские службы, обеспечивающие движение составов на крупных железнодорожных узлах, сельскохозяйственные организации, применяющие технологии «точного земледелия».

Сетевые системы в зависимости от области обслуживания делятся на: региональные, широкозонные, глобальные.

Для них характерными являются:

- сеть станций мониторинга;
- медленные поправки (эфemerидно-временные и ионосферные);

- большее по сравнению с локальными станциями «время тревоги»;
- относительно низкая точность (по отношению к локальной системе).

Часто в литературе встречается термин «региональные дифференциальные системы», подразумевающий, что зона действия таких систем составляет от 300 до нескольких тысяч километров.

Зоной действия широкозонных дифференциальных подсистем (ШДПС) является территория с радиусом в несколько тысяч километров. Совокупность широкозонных подсистем в принципе может обеспечивать «бесшовную» навигацию повышенного качества в глобальном масштабе.

Принцип действия ШДПС заключается в следующем:

- на обширной территории разворачивается сеть опорных измерительных станций, являющихся источниками «сырой» навигационной информации по определенной ГНСС;

- «сырая» измерительная информация передается в реальном времени в единый центр обработки, где на ее основе вырабатываются корректирующая информация, представляющая собой поправки к текущим параметрам эфемерид и частотно-временным параметрам ГНСС, а также параметры модели ионосферы;

- выработанная корректирующая информация тем или иным путем распространяется на обширной территории и доносится до конкретных потребителей.

В описанных выше принципах важное место занимает доставка корректирующей информации до потребителей. Современный опыт построения таких систем говорит в пользу целесообразности применения для этих целей сигналов геостационарных искусственных спутников Земли (ИСЗ).

Широкозонные дифференциальные системы, использующие геостационарные спутники, передают сигнал, подобный сигналу от орбитального спутника ГНСС. В литературе встречается общее название широкозонных дифференциальных систем WADGPS (Wide Area Differential GPS). В международной организации гражданской авиации (ICAO – International Civil Aviation Organization) принято название SBAS (Satellite Based Augmentation System) – спутниковые системы функционального дополнения.

Сигналы таких ИСЗ «освещают» конкретный регион, что позволяет доставлять корректирующую информацию всем потребителям, функционирующим в его пределах.

В настоящее время за рубежом функционируют следующие ШДПС:

WAAS (Wide Area Augmentation System), США;

CDGPS (Canadian Differential GPS), Канада;

EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), Европа;

MSAS (Japanese Multi-functional Satellite Augmentation System), Япония;

GAGAN (GPS aided geo augmented navigation), Индия.

WAAS — американская система распространения дифференциальных поправок. Разработана в США для повышения точности позиционирования и достоверности данных навигационных GPS-систем. В первую очередь предназначена для применения в авиации.

Сигналы WAAS транслируются с нескольких геостационарных спутников над территорией США и принимаются GPS-навигаторами с помощью одного или нескольких каналов. Сигнал

WAAS содержит коррекции (поправки) к GPS-сигналам, используя которые GPS-приемник значительно улучшает точность измерения. Это возможно благодаря тому, что сигнал WAAS передается на той же частоте, что и сигнал C/A L1 системы GPS, и имеет схожую структуру кодирования.

Космический сегмент представляет собой шесть геостационарных спутников, выполняющих прием и ретрансляцию корректирующей информации по зоне своей видимости, в которую входит вся Северная Америка и граничащие с ней морские территории (рисунок 1).

Разработчики системы WAAS предложили специальную координатную сетку поправок для описания модели ионосферных задержек. Поверхность Земли поделена на девять зон, каждая из которых содержит 201 точку (последняя – 200). Для каждой точки с учетом данных базовых станций моделируется и вычисляется значение ионосферной задержки (рисунок 2).

Любой из геостационарных спутников SBAS покрывает ограниченную территорию, соответственно он может передавать информацию только для 3–4 зон. Эти ограничения связаны с территориальной принадлежностью систем и расположением сети базовых станций, определяющих точность моделирования поправок.

Считается, что каждая станция эффективно «покрывает» окружающую территорию радиусом 400–500 км. Время передачи данных с базовых станций на геостационарные спутники составляет несколько секунд. В рабочем режиме обновление данных, связанных с ошибками часов и эфемерид, осуществляется с периодом две минуты. Данные ионосферных задержек обновляются несколько реже, потому

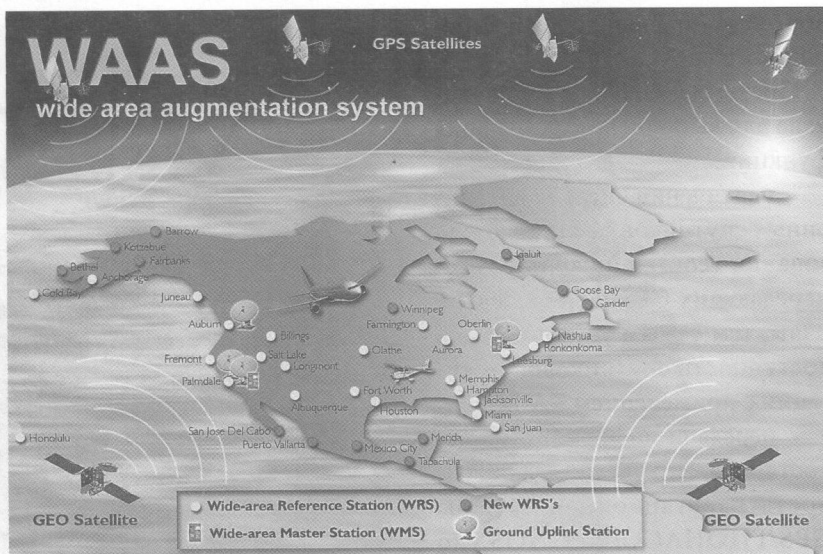


Рисунок 1 – Американская ШДПС WAAS (Wide Area Augmentation System)

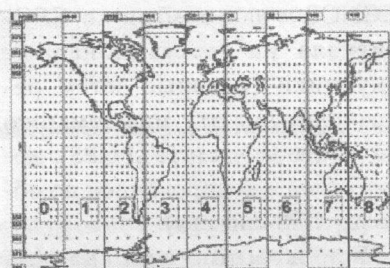


Рисунок 2 – Координатная сетка поправок

что изменяются во времени значительно медленнее. Для вычисления значения ионосферной ошибки в текущем местоположении GPS приемник использует данные четырех соседних «узловых» точек. Если текущее местоположение находится в непосредственной близости от «узловой

точки, то дополнительные вычисления могут не понадобиться.

Канадская сеть CDGPS аналогична системе США и в первую очередь предназначена для использования на море. Охватывает Атлантическое и Тихоокеанское побережье, а также район Великих озер и реку Святого Лаврентия.

EGNOS создана по заказу и под наблюдением так называемой Европейской тройственной группы (European Tripartite Group – ETG), объединяющей представителей Европейского космического

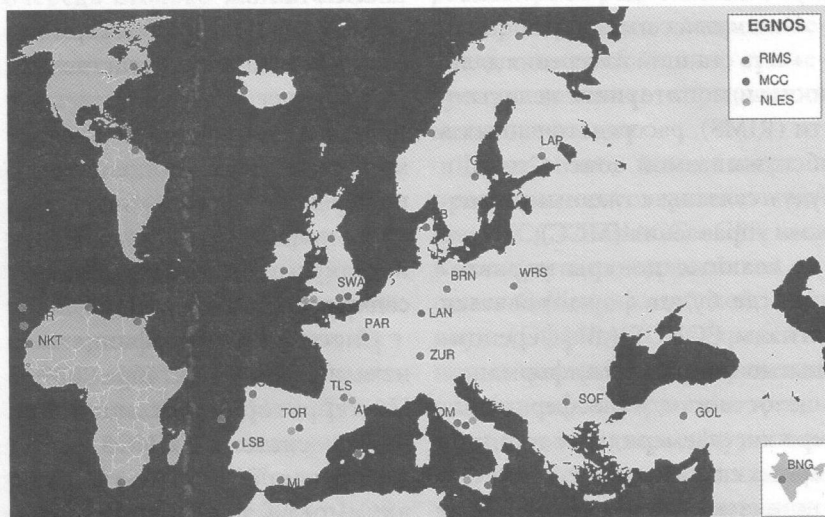


Рисунок 3 – Европейская ШДПС EGNOS

агентства, Евроконтроля и Европейского сообщества.

Система EGNOS предназначена для выполнения следующих функций:

- увеличения числа навигационных спутников за счет использования геостационарных ИСЗ, передающих GPS-подобные сигналы, тем самым увеличивается доступность спутниковой навигации с применением RAIM;
- передачи информации о целостности. Это увеличит доступность навигационной службы GPS/ГЛОНАСС/ EGNOS до уровня, соответствующего требованиям неточного захода на посадку;
- передачи корректирующих поправок, что позволит обеспечить точность до уровня, соответствующего требованиям точного захода на посадку по I-й категории.

Основу орбитального сегмента EGNOS составляют геостационарные спутники связи INMARSAT-III (в будущем ARTEMIS), на которых установлен прозрачный ретранслятор навигационных сигналов C/L-диапазона (6.4/1.5 ГГц) с полосой 1575.42 ± 2.2 МГц. Он обеспечивает передачу C/A кода, навигационного сообщения и сообщения о целостности созвездия спутников.

Наземный сегмент:

- сеть станций измерения дальности и мониторинга целостности (RIMS), рассредоточенных в обслуживаемой зоне. Станции будут связаны с главными центрами управления (МСС);
- главные центры управления, где будут формироваться сигналы EGNOS (дифференциальные поправки, информация о целостности, ионосферные задержки, эфемериды геостационарных спутников);
- наземные навигационные станции (NLES), предназначенные

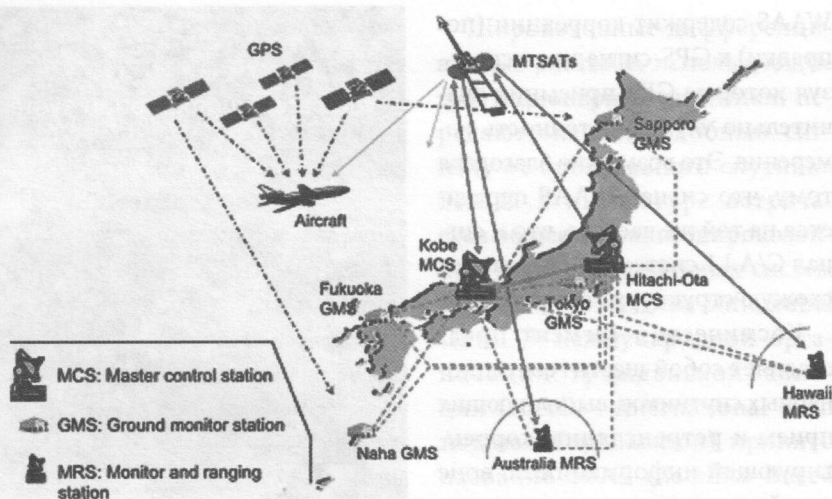


Рисунок 4 – Японская ШДПС MSAS

для закладки информации EGNOS и дальномерного GEO-сигнала на геостационарные спутники (которые затем ретранслируют эту информацию на Землю на частоте L1 GPS с модуляцией и кодированием по образцу GPS-сигнала).

Все компоненты наземного сегмента взаимосвязаны с широкозонной сетью связи EGNOS (EWAN). На этапе начального функционирования EGNOS наземный сегмент будет включать:

примерно 40 RIMS, распределенных по всей зоне обслуживания;

сегмент потребителей: стандартные приемники GPS / ГЛОНАСС / SBAS.

EGNOS/IOC рассматривается как основное средство навигации для фазы океанического полета и для континентальных маршрутов и как дополнительное средство для терминальной фазы полета, грубого захода на посадку и точного захода на посадку по I-й категории.

Система EGNOS официально начала работу в октябре 2009 г. На территории России и Беларуси система EGNOS работает некорректно из-за плохой видимости геостационарных спутников.

Японская система MSAS аналогична системам WAAS и EGNOS и обеспечивает навигационное обслуживание всех воздушных судов в воздушном пространстве Японии (рисунок 4).

В качестве основы орбитального сегмента будут использоваться разрабатываемые в Японии многофункциональные транспортные космические аппараты MSAT-1R и MTSAT-2.

В Индии к 2013 г. была введена в эксплуатацию система дифференциальной коррекции GAGAN. Воздушные суда, оснащенные приемниками SBAS, теперь



Рисунок 5 – Индийская ШДПС GAGAN

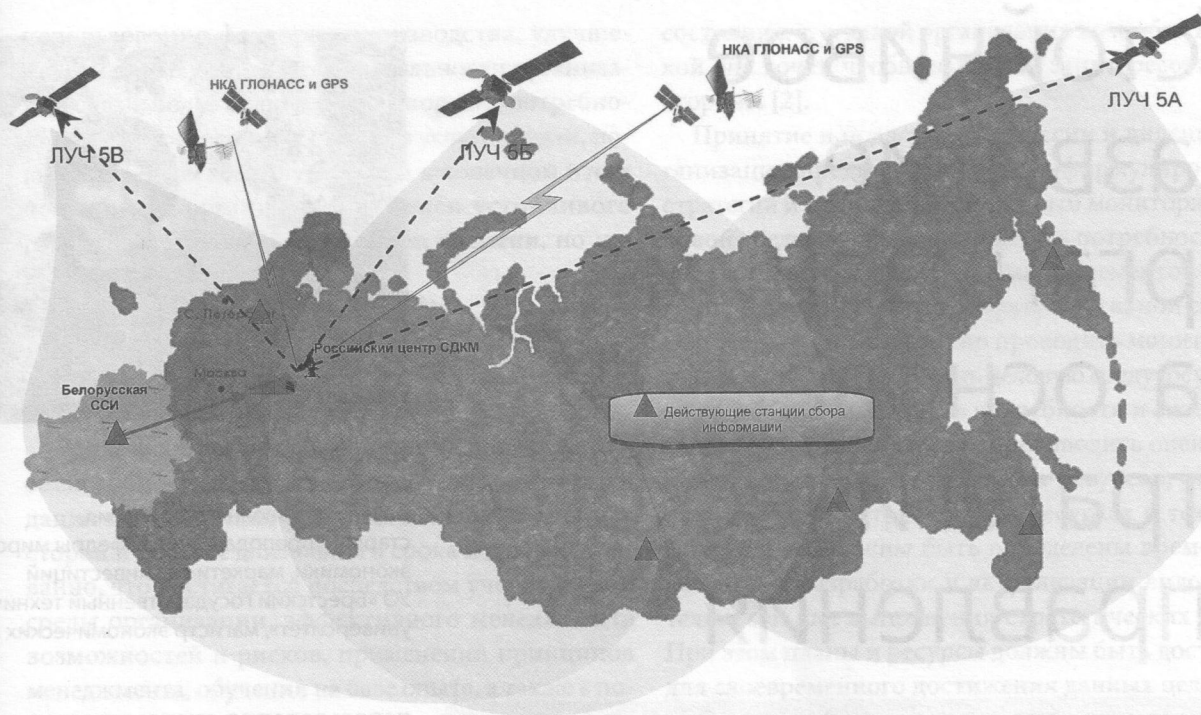


Рисунок 6 – Единое радионавигационное пространство Российской Федерации и Республики Беларусь

имеют возможность использовать сигналы GAGAN в индийском воздушном пространстве для навигации.

Наличие сигнала GAGAN в воздушном пространстве Индии восполняет пробел в зонах покрытия геостационарных навигационных служб Евросоюза EGNOS и Японии MSAS.

Индийская SBAS включает:

- 15 опорных станций;
- 3 наземные передающие станции спутниковой связи;
- 3 координационных центра;
- 3 геостационарных навигационных спутника, которые работают в L-диапазоне частот и имеют соответствующее программное обеспечение и линии связи.

В Российской Федерации в стадии внедрения находится система дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ), принципы работы которой аналогичны SBAS системам. СДКМ будет предоставлять потребителю

контрольно-корректирующую информацию в диапазоне частот, на которых работают ГНСС ГЛОНАСС и GPS.

В состав системы уже входят более десятка станций мониторинга, расположенных на территории России, Антарктики, а также Бразилии, и около 50 станций сбора измерений (ССИ) более чем в 30 странах. В Китае будет установлено три наземные станции ГЛОНАСС, в свою очередь столько же китайских станций системы «Бейдоу» на паритетных началах планируется установить на территории России.

Корректирующие сигналы в формате RTCM SC-104 (начиная со стандарта версии 2.2, коды 31, 1009–1012) будут ретранслироваться тремя геостационарными спутниками Луч (Луч-5А 167° в.д., запуск произведен в декабре 2011 г.; Луч-5Б 16° з.д., запуск произведен в ноябре 2012 г.; Луч-5В 95° в.д., запуск произведен в апреле 2014 г.). Области распространения приема

сигналов от них показаны на рисунке 6.

Одна из наземных станций сбора измерений ССИ для СДКМ будет установлена в Минске на территории ОАО «АГАТ-системы управления» – управляющая компания холдинга «Геоинформационные системы управления». С введением в эксплуатацию СДКМ на территории Республики Беларусь и Российской Федерации будет создано равномерное радионавигационное пространство, которое обеспечит потребителям субметровую точность определения местоположения.

Дальнейшее техническое и программное совершенствование ГНСС ГЛОНАСС и GPS, ввод в эксплуатацию европейской системы Galileo и китайской «Бейдоу» (COMPASS), разработка новых алгоритмов устранения ошибок ионосферного и тропосферного характера дадут в перспективе дециметровую и сантиметровую точность навигационных измерений.