

А. П. КАРПИК, Л. А. ЛИПАТНИКОВ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ВЫСОКОТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПО СИГНАЛАМ ГЛОНАСС И GPS

Представлены предложения по обеспечению совместимости и взаимодополняемости методов Real Time Kinematic (RTK) и Precise Point Positioning (PPP) высокоточного позиционирования подвижных объектов с помощью малобюджетной аппаратуры ГЛОНАСС/GPS, позволяющие перейти к широкому внедрению передовых модификаций этих методов и не требующие изменения существующей наземной инфраструктуры.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), массовая аппаратура потребителя, наземная инфраструктура, абсолютный метод, относительный метод

Введение

В настоящее время одной из актуальных задач развития технологий глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) является расширение возможностей позиционирования подвижных объектов с использованием массовой аппаратуры потребителя. К такой аппаратуре можно отнести широкий спектр средств, оснащённых современными навигационными ГНСС-модулями: автомобильные и персональные навигационные устройства, телематические терминалы мониторинга транспорта, смартфоны и т. д. Современные ГНСС-модули навигационного класса зачастую способны выполнять фазовые измерения, что позволяет применять их для высокоточного позиционирования – с погрешностями на уровне 1 дм и менее. Малобюджетная аппаратура потребителя, обеспечивающая такой уровень точности, может найти широкое применение в решении различных практических задач, а именно:

- *точный контроль автотранспорта* – выявление случаев нарушения правил дорожного движения в процессе мониторинга транспорта, а также при разборе дорожно-транспортных происшествий;
- *применение в автоматизированных системах управления* строительной и сельскохозяйственной техникой;
- *точная персональная навигация* может применяться, например, при поиске небольших малозаметных или скрытых под грунтом, водой или снегом объектов: подземных или подводных коммуникаций, скважин и т. д. – на промышленных площадках, железнодорожных станциях, объектах энергетики, коммунального хозяйства и др.;

Карпик Александр Петрович. Доктор технических наук, профессор, ректор ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия» (г. Новосибирск).

Липатников Леонид Алексеевич. Кандидат технических наук, младший научный сотрудник ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия».

- *решение некоторых задач инженерной геодезии*, в частности при геодезическом обеспечении производства земляных работ, также возможно с использованием малобюджетной аппаратуры потребителя ГНСС; при этом для перехода от определяемых геодезических высот (над поверхностью эллипсоида) к нормальным высотам (над поверхностью квазигеоида), используемым на практике, потребуется учёт параметров локальной модели гравитационного поля [1];
- *топография* может стать ещё одним направлением применения массовой аппаратуры ГНСС, что позволит на первом этапе на один-два порядка повысить точность открытых геоинформационных онлайн-систем, таких как OpenStreetMap и Wikimapia. Следующим этапом должно стать создание на основе такой аппаратуры дешёвых средств автоматического сбора геопространственной информации в режиме реального времени для систем виртуальной геореальности, что является одним из аспектов перехода к новому технологическому укладу [2].

В настоящее время существуют глобальные системы функциональных дополнений ГНСС, такие как StarFire, OmniSTAR, Trimble CenterPoint RTX, позволяющие выполнять позиционирование с погрешностью на уровне 1 дм и менее. Эти системы предоставляют потребителям корректирующую информацию на платной основе и ориентированы на применение специализированной аппаратуры. На основе анализа работ [3, 4, 6] установлено, что количество базовых станций каждой из этих систем вблизи территории Российской Федерации исчисляется единицами. Таким образом, указанные системы не обладают достаточно развитыми сетями постоянно действующих базовых станций для обеспечения российских потребителей детальной информацией о состоянии ионосферы, что необходимо для высокоточного позиционирования при использовании одностанционной аппаратуры. В то же время количество созданных в различных регионах России постоянно действующих базовых станций ГНСС, по некоторым оценкам, составляет ~270.

Доступное высокоточное позиционирование с использованием массовой аппаратуры потребителя ГНСС предполагает решение ряда проблем. Эти проблемы обусловлены как особенностями массовой аппаратуры, в частности тем, что она позволяет выполнять лишь одностанционные измерения, так и спецификой применяемых методов математической обработки результатов ГНСС-измерений.

Цель данной статьи – наметить решения, которые позволят в ближайшем будущем перейти к массовому внедрению доступных средств высокоточного позиционирования при максимально эффективном использовании потенциала существующей в России наземной инфраструктуры ГНСС.

Методы высокоточного позиционирования

К методам, наиболее подходящим для высокоточного позиционирования подвижных объектов с помощью ГНСС в режиме реального времени, можно отнести *Network Real Time Kinematic* (NRTK) и *Precise Point Positioning* (PPP).

Real Time Kinematic (RTK) – относительный метод позиционирования в режиме реального времени, суть которого заключается в определении координат вектора от базовой станции (положение которой известно) до мобильной станции, положение которой определяется. Для этой цели на мобильную станцию

по беспроводным каналам связи в режиме реального времени передаются результаты ГНСС-измерений, выполненных базовой станцией, и её координаты. Преимущество данного метода – высокая точность оценок координат при малой длине базовой линии между станциями. Среднеквадратическая погрешность определения планового положения (т.е. положения на плоскости) одночастотной аппаратурой в кинематическом режиме при базовых линиях до 20 км и нормальных ионосферных условиях характеризуется эмпирической формулой: $5 \text{ см} + 5 \text{ мм/км}$ [7, с. 439], т. е. при длине базовой линии 20 км ожидаемая среднеквадратическая погрешность равна 15 см.

Существуют также различные «сетевые» варианты метода RTK (*Network RTK* – *NRTK*), предполагающие учёт дополнительных корректирующих параметров, вычисляемых по данным ГНСС-измерений на сервере сети базовых станций. Метод *NRTK* обеспечивает более высокую точность позиционирования в сравнении с *RTK* за счёт более точного учёта пространственно-автокоррелированных погрешностей ГНСС-измерений, в частности обусловленных влиянием атмосферы. Передача *NRTK*-поправок возможна в нескольких форматах, наиболее распространёнными из которых являются *RTCM* и *CMR*. Стандартные сообщения в этих форматах могут быть использованы для реализации различных концепций учёта корректирующей информации, например для:

- виртуальной базовой станции (*Virtual Reference Station* – *VRS*) [8, 9];
- базовой псевдостанции (*Pseudo Reference Station* – *PRS*) [9];
- площадных поправок (*Flächen Korrektur Parameter* – *FKP*) [8, 10];
- главной и вспомогательных базовых станций (*Master-Auxiliary Concept* – *MAC*) [11];
- индивидуализированной концепции *MAC* (*Individualized Master-Auxiliary Concept* – *iMAC*) [11].

Ключевое различие между перечисленными вариантами метода *NRTK* заключается в способе представления сетевых поправок, передаваемых вместе с результатами ГНСС-измерений, выполненных на базовой станции.

Precise Point Positioning (*PPP*) – высокоточный абсолютный метод позиционирования, предполагающий использование уточнённой эфемеридно-временной информации (ЭВИ). Оперативно уточнённая ЭВИ в режиме реального времени передаётся на мобильную станцию по беспроводным каналам связи. В качестве источника такой информации может выступать Международная служба ГНСС (*RT-IGS*) [12], а в перспективе и системы дифференциального дополнения ГНСС космического базирования [13]. Алгоритмы *PPP* для позиционирования по одночастотным ГНСС-измерениям рассмотрены в работах [14–16]. Важнейшим преимуществом метода *PPP* является его применимость теоретически в любой точке, где принимаются сигналы ГНСС, независимо от расстояния до базовых станций. Двухчастотный вариант метода может обеспечивать определение координат с погрешностями на уровне 1 дм [13].

Наиболее перспективными в настоящее время являются варианты метода *PPP* с разрешением неоднозначностей фазовых измерений [9, 17]. Внедрение этих методов позволило бы многократно повысить эффективность существующей инфраструктуры ГНСС и обеспечить субдециметровый уровень точности позиционирования в режиме реального времени практически повсеместно. Однако к настоящему моменту часть этих методов находится на стадии апробации, ни один из них ещё не нашёл широкого применения на территории России. Зна-

чительная часть наземной инфраструктуры ГНСС, представленной региональными сетями постоянно действующих базовых станций, ориентирована на метод NRTK. Согласованный переход на новые методы позиционирования потребовал бы замены программного обеспечения серверов, либо их интеграции в единую сеть. В настоящее время в России работы по развитию и обслуживанию геодезических сетей постоянно действующих базовых станций выполняются различными ведомствами и организациями независимо друг от друга [18]. Процесс интеграции этих сетей находится на начальной стадии. В этих условиях не приходится рассчитывать на переход к использованию новых методов в обозримой перспективе. Поэтому актуальной задачей является разработка способа обеспечения взаимодополняемости методов PPP и RTK без внесения изменений в существующую наземную инфраструктуру ГНСС.

В широком смысле под термином «взаимодополняемость» понимается возможность выбора пользователем того или иного метода в зависимости от конкретных условий, в частности от расстояния до ближайшей базовой станции, для достижения наилучших результатов. В работе [19] показано, что в настоящее время преждевременно говорить об отказе от одного из методов в пользу другого. Как будет показано далее, одним из ключевых аспектов взаимодополняемости является использование в одночастотной реализации метода PPP данных о состоянии ионосферы на локальном участке, которые можно получать от существующих региональных сетей. Также в методе NRTK может использоваться информация, применяемая в методе PPP, в частности уточнённая эфемеридно-временная информация. В последнем случае необходимо, чтобы при формировании NRTK-поправок и при оценивании координат мобильной станции использовалась одна и та же ЭВИ.

В методе PPP использование одночастотной аппаратуры является ключевым фактором, ограничивающим точность позиционирования. При обработке одночастотных ГНСС-измерений поправки, компенсирующие влияние ионосферы, рассчитываются с использованием некоторой модели, описывающей её состояние. В режиме реального времени могут использоваться прогнозные значения параметров состояния ионосферы, либо оперативно уточнённые по результатам ГНСС-измерений, выполненных сетью базовых станций.

Прогноз состояния ионосферы может быть получен из различных источников. В навигационных сообщениях GPS содержатся параметры модели Клобу-чара, относительная погрешность которых достигает 50%. Существуют более точные глобальные прогнозы состояния ионосферы, в частности, публикуемые Европейским центром определения орбит [20]. В России создаётся информационный центр, который будет выполнять прогнозирование состояния ионосферы на основе ассимиляционной модели, заявленный уровень погрешностей которой не превышает 10% [21]. Это в настоящее время является пределом точности глобальных прогнозов состояния ионосферы [22, с. 143]. Такой уровень точности соответствует остаточной погрешности измерения дальностей от полуметра до нескольких метров.

Повысить точность учёта ионосферного эффекта для достижения дециметрового и даже сантиметрового уровня можно за счёт использования региональных моделей ионосферы, параметры которых определяются по данным ГНСС-измерений сетей постоянно действующих базовых станций. В широко применяемом методе NRTK поправки ГНСС-измерений относительны, то есть предназначены лишь для компенсации разности погрешностей измерений на базовой и мобильной станциях. Эти поправки сами по себе не позволяют компенсиро-

ровать погрешности измерений в методе PPP. Однако, как будет показано далее, весь набор информации, передаваемой на мобильную станцию в методе NRTK, включая данные двухчастотных ГНСС-измерений с базовой станции, достаточен для практически полного учёта влияния ионосферы в методе PPP. Принципиальным преимуществом такого подхода является то, что его можно реализовать без внесения каких-либо изменений в программное обеспечение существующих в России сетей базовых станций.

Способ использования NRTK-поправок в методе PPP

Учёт влияния ионосферы на результаты одночастотных ГЛОНАСС/GPS-измерений, выполненных аппаратурой потребителя, в методе PPP предлагается выполнять в режиме реального времени в соответствии с выражениями:

$$\Phi'_1 = \Phi_1 + I_\Phi - \delta I, \quad (1)$$

$$P'_1 = P_1 + I_P + \delta I, \quad (2)$$

где P'_1 , Φ'_1 , P_1 , Φ_1 – исправленные кодовая и фазовая псевдодальности и измеренные кодовая и фазовая псевдодальности соответственно на частоте L1, м; I_Φ , I_P – поправки за влияние ионосферы для базовой станции, м; δI – относительная поправка за влияние ионосферы, м.

Поправки I_P , I_Φ могут быть вычислены по данным двухчастотных ГНСС-измерений, выполненных на базовой станции и переданных на мобильную станцию:

$$I_P = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (P_1 - P_2 - d), \quad (3)$$

$$I_\Phi = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (\Phi_1 - \Phi_2), \quad (4)$$

где P_1, P_2 – кодовые псевдодальности на частотах f_1 и f_2 , измеренные на базовой станции и относящиеся к одному спутнику; Φ_1, Φ_2 – фазовые псевдодальности; d – дифференциальная задержка кодовых сигналов в аппаратуре. Вычисленная по формуле (4) поправка I_Φ будет смещена на постоянную для каждого непрерывно наблюдаемого спутника величину, так как фазовые измерения содержат неоднозначности. Однако в методе PPP постоянные смещения фазовых псевдодальностей оцениваются совместно с координатами мобильной станции, и поэтому никак не скажутся на точности решения.

Поправка δI в формулах (1), (2) вычисляется по данным сообщений, содержащих дополнительные параметры коррекции по методу NRTK. Рассмотрим вычисление этой поправки на примере FKP. Формулы для вычисления поправки δI по данным сообщения RTCM типа 59 для частот L1 GPS приведены в работе [10]:

$$\delta I^{GPS} = \frac{120}{154} \cdot 6,37 \cdot M \cdot (N_I \cdot (B - B_R) + E_I \cdot (L - L_R) \cdot \cos(B_R)), \quad (5)$$

$$M = 1 + 16 \left(0,53 - \frac{h}{\pi} \right)^3, \quad (6)$$

где N_I – составляющая градиента ионосферной поправки в направлении север-юг для узкополосной комбинации фазовых измерений GPS, мм/км; E_I – составляющая градиента ионосферной поправки в направлении восток–запад для узкополосной комбинации фазовых измерений GPS, мм/км; B – приближённая геодезическая широта мобильной станции в системе WGS84, рад; L – приближённая геодезическая долгота мобильной станции в системе WGS84, рад; B_R, L_R – геодезические координаты базовой станции в системе WGS84, рад; h – угловая высота спутника над горизонтом, рад.

Используя соотношение частот, можно вычислить поправку для частоты L1 ГЛОНАСС

$$\delta I^\Gamma = \left(\frac{f_1^G}{f_1^\Gamma} \right)^2 \cdot \delta I^G, \quad (7)$$

где δI^Γ – относительная ионосферная поправка для частоты f_1^Γ того спутника ГЛОНАСС, для которого рассчитывается поправка; δI^G – относительная ионосферная поправка для частоты L1 GPS f_1^G .

Согласно результатам исследования [8] при невозмущённом состоянии ионосферы ожидаемые погрешности определения ионосферной поправки по методике FKP не превышают 1 дм с вероятностью 85% при длинах базовых линий ~150 км. С вероятностью 95% погрешности не превышают 4 см при расстояниях ~50 км. Таким образом, использование данных NRTK позволит повысить точность учёта влияния ионосферы в PPP на порядок. Такой уровень точности достаточен для разрешения неоднозначности одночастотных фазовых измерений в PPP и обеспечения возможности позиционирования с погрешностями менее 1 дм при расстояниях до базовых станций около 100 км.

Предположительно аналогичных результатов можно достичь, используя данные коррекции других вариантов NRTK, таких как MAC, VRS, PRS. В случае VRS и PRS поправка будет включать лишь часть, относящуюся к виртуальной базовой станции, вычисляемую по формулам (3), (4), так как относительные поправки уже учтены в синтезированных результатах ГНСС-измерений виртуальных базовых станций.

Применение метода NRTK оправдано при расстояниях до нескольких десятков километров от базовых станций. Метод PPP целесообразно применять при больших расстояниях, на границах зон покрытия сетей базовых станций, а также при малой или неравномерной плотности этих сетей, в частности в «пустотах» между региональными сетями.

Теоретически применение метода PPP с использованием ионосферных NRTK-поправок вместо собственно метода NRTK в указанных случаях обосновано тем, что помимо ионосферного эффекта на точность позиционирования методом NRTK оказывают влияние погрешности учёта тропосферной задержки и погрешности бортовых эфемерид.

В методе PPP зенитная тропосферная задержка оценивается совместно с другими параметрами, точность её учёта не зависит от расстояния до базовых станций. В NRTK тропосферная задержка сигнала компенсируется поправкой, вычисляемой по данным ГНСС-измерений в сети базовых станций, и точность компенсации зависит от расстояния до ближайших станций. При этом зона, в которой NRTK-поправка за влияние тропосферы может быть интерполирована

или экстраполирована, меньше, чем для ионосферной поправки. Это обусловлено тем, что состояние нижнего слоя атмосферы (тропосферы) неоднородно и сильно зависит, например, от рельефа и других свойств подстилающей поверхности. Оно может значительно отличаться в точках расположения базовой и мобильной станций при расстояниях в несколько десятков километров между ними. Ионосфера же может быть аппроксимирована тонким слоем на высоте 450 км [22]. Поэтому в отсутствие значительных ионосферных возмущений для станций на расстояниях 100–200 км различия условий распространения радиосигнала в ионосфере могут быть достаточно точно учтены с помощью градиентов по формулам (5)–(7), что подтверждается результатами исследования [8], приведёнными выше. Этим обоснована рекомендация по применению метода PPP с использованием ионосферных NRTK-поправок на границах зон покрытия сетей, а также в «белых пятнах» между сетями. Конкретные значения расстояний между мобильной и базовой станциями, при которых более целесообразным становится использование метода PPP, планируется определить экспериментально в ходе дальнейших исследований.

Обеспечение совместимости методов NRTK и PPP

Ещё одним важным моментом является корректность совмещения результатов, получаемых методами RTK (NRTK) и PPP. На практике определяемые координаты мобильной станции в этих двух методах относятся к разным реализациям общеземной системы координат; расхождения в оценках координат по двум методам могут достигать нескольких дециметров и более. Это вызвано двумя основными причинами.

Во-первых, значения координат базовых станций в общеземной системе координат (ОЗСК), реализациями которой являются ITRF и WGS84, могут быть определены со значительными погрешностями. В силу отсутствия единых правил создания сетей опорных базовых станций на территории России определение положения этих станций в ОЗСК выполнялось по-разному. Уровень точности такой геодезической привязки может сильно варьироваться в зависимости от применявшегося метода, квалификации исполнителей и используемого программного обеспечения, а также от расстояний до исходных пунктов в случае применения относительного метода [23]. Точность определения координат внутри сети, как правило, на порядок выше точности привязки к координатной основе ITRF.

Во-вторых, для удобства пользователей координаты базовых станций сохраняют неизменными на протяжении ряда лет. Это позволяет один раз определить параметры перехода к применяемым пользователями системам координат, не подверженным временной эволюции. В то же время положение пунктов в ОЗСК постепенно меняется вследствие движения литосферных плит. Для небольшой по размерам региональной сети базовых станций это будет приводить к линейному смещению и развороту всей сети как единого целого. Например, для сети активных базовых станций Новосибирской области за 4 года накопленное смещение относительно ОЗСК составило около 11 см. Для обеспечения согласованности оценок координат необходим учёт скоростей движения пунктов в общеземной системе координат, значения которых можно вычислить с использованием подходящей модели движения тектонических плит.

Согласование оценок координат, получаемых методами PPP и NRTK, может быть достигнуто за счёт ввода дополнительной промежуточной системы координат, фактически реализуемой каталогом координат базовых станций. Параметры перехода между этой системой координат и ITRF должны быть определены, зафиксированы и опубликованы на определённую дату. Кроме того, должно учитываться изменение этих параметров со временем под действием движения литосферных плит. Данный подход применим в том случае, если сеть станций не находится на тектоническом разломе и движется как единое целое.

Экспериментальная оценка точности позиционирования

Цель экспериментального исследования – оценка достижимого уровня точности позиционирования с использованием малобюджетной навигационной аппаратуры потребителя ГНСС, а также оценка значимости рассмотренных источников погрешностей и действенности предложенных решений.

В качестве образца малобюджетной аппаратуры потребителя в исследовании использовался разработанный ООО «НТП «СТaТТ» прототип телематического терминала мониторинга автотранспорта, оснащённый навигационным модулем NV08C-CSM и компактной антенной NV2410. Данная аппаратура позволяет выполнять ГЛОНАСС/GPS-измерения на частоте L1.

В исследовании использовались данные ГЛОНАСС/GPS-измерений, выполненных в течение суток 01.05.2014 с интервалом 30 с. Оценивание координат выполнялось в кинематическом режиме относительным методом и методом PPP. Применялись рекуррентные алгоритмы оценивания координат на основе фильтра Калмана, аналогичные алгоритмам позиционирования в режиме реального времени. Использовалась усовершенствованная авторами версия пакета программ RTKLIV [24], включающая дополнительный блок выявления разрывов одночастотных фазовых ГНСС-измерений.

В ходе эксперимента определялись координаты пункта NSKN, относящегося к эталонному пространственному полигону Сибирской государственной геодезической академии (СГГА). При оценивании координат относительным методом в качестве базовой станции использовалась постоянно действующая станция NSKW, расположенная на том же здании, что и NSKN. Длина базовой линии составила 12,7 м.

При оценивании координат методом PPP в качестве исходных данных использовались высокоточные окончательные эфемериды и заданные с 30-секундным интервалом поправки бортовых шкал времени ГЛОНАСС и GPS, предоставленные российской Системой высокоточного определения эфемерид и временных поправок [25].

Оценивание координат выполнялось на каждую эпоху измерений в кинематическом режиме двумя методами с использованием различных поправок за влияние ионосферы, рассчитываемых на основе данных, передаваемых от базовых станций в методе NRTK; данных навигационного сообщения GPS; окончательных параметров глобальной модели состояния ионосферы IGS (IONEX).

Точность позиционирования оценивалась по отклонению оценок координат от их эталонных значений. При оценке точности позиционирования по методу PPP не учитывались результаты, полученные по данным первого часа и последних 30 минут сеанса измерений. При оценке точности относительного позицио-

нирования исключались грубые результаты (при отклонениях более 30 см от эталонного положения) – всего было отбраковано около 2% результатов.

В таблице приведены значения среднеквадратических отклонений (СКО) оценок местоположения от эталона в направлениях на восток (E), на север (N), в вертикальном направлении (U), а также модуль вектора СКО (3D).

Среднеквадратические отклонения оценок координат от эталона

Метод позиционирования	Ионосферная поправка	СКО, м			
		E	N	U	3D
Относительный	-	0,033	0,025	0,024	0,048
Абсолютный (PPP)	NRTK	0,046	0,042	0,057	0,084
Абсолютный (PPP)	IONEX	0,437	0,366	1,077	1,219
Абсолютный (PPP)	GPS	1,201	1,387	2,989	3,507

Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что субдециметровый уровень точности определения координат может быть обеспечен с помощью малобюджетной аппаратуры как относительным методом, так и методом PPP при использовании NRTK-поправок, компенсирующих влияние ионосферы. Использование глобальных моделей ионосферы позволяет получать на 1–2 порядка более грубые оценки координат, что является ключевым фактором, ограничивающим точность позиционирования методом PPP по данным одночастотных ГНСС-измерений, выполненных малобюджетной аппаратурой.

Эталонные значения координат были определены на дату 17.11.2011 и приведены на дату измерений с учётом вектора смещения пунктов NSKW и NSKN, вычисленного с помощью модели движения литосферных плит GEODVEL 2010 [26]. Модуль вектора составил 6,4 см. Учёт смещения обеспечил совместимость результатов высокоточного позиционирования относительным и абсолютным методами.

В дальнейшем планируется оценить точность позиционирования на различных расстояниях от базовой станции, в том числе в режиме реального времени.

Заключение

Предложенные авторами решения позволяют обеспечить совместимость и взаимодополняемость высокоточного абсолютного метода позиционирования PPP и относительного (дифференциального) метода NRTK с учётом особенностей существующих сегодня в России сетей постоянно действующих базовых станций. Это должно стать первым этапом перехода к широкому внедрению более совершенных методов позиционирования, которые в перспективе позволят обеспечить возможность определения координат в режиме реального времени с погрешностями на уровне 1 дм и менее для всех пользователей ГНСС.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сурнин, Ю. В.** О создании активной координатно-гравитационной основы на ограниченном участке земной поверхности с помощью ГЛОНАСС/GPS-измерений // VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т.1, ч.2. – 2011. – С. 203–214.
2. **Лисицкий, Д. В.** Перспективы развития картографии: от системы «Цифровая земля» к системе виртуальной геореальности // Вестник СГГА. – Новосибирск: СГГА, 2013. – № 2(22). – С. 8–16.

3. **Dixon, K.** StarFire: A Global SBAS for Sub-Decimeter Precise Point Positioning [Электронный ресурс] / K. Dixon // Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2006), Fort Worth, TX, сент. 2006. – С. 2286–2296. – Режим доступа: <http://www.gdgps.net/system-desc/papers/starfire.pdf>
4. **Виссер, Х.** Возможности глобального высокоточного сервиса OmniSTAR HP для картографирования и создания ГИС-проектов [Электронный ресурс] / Х. Виссер // Геопрофи. – 2008. – № 3 – С. 56–59. – <http://www.geoprofi.ru/default.aspx?mode=binary&id=951>
5. **Chen, X.** Trimble RTX, an innovative new approach for Network RTK [Электронный ресурс] / X. Chen, T. Allison, W. Cao, K. Ferguson, S. Grünig, V. Gomez, A. Kipka, J. Köhler, H. Landau, R. Leandro, G. Lu, R. Stolz, N. Talbot // Proc. ION GNSS 2011. – Portland, Oregon, 19–23 сент. 2011. – С. 2214–2219. – http://www.trimble.com/positioning-services/pdf/whitepaper_rtx_fast.pdf
6. **Leandro, R.** Real-Time Extended GNSS Positioning. A New Generation of Centimeter-Accurate Networks [Электронный ресурс] / R. Leandro, H. Landau, M. Nitschke [и др.] // GPS World. – 2012. – Т. 23, вып. 7. – С. 36–42. – <http://editiondigital.net/publication/?i=119153>
7. **Hofmann-Wellenhof, B.** GNSS - Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and more / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, E. Wasle. - Wien: Springer-Verlag, 2008. - 516 с.
8. **Landau, H.** Virtual reference stations versus broadcast solutions in Network RTK – advantages and limitations [Электронный ресурс] / H. Landau, U. Vollath, X. Chen // Positioning. – Vol. 4 No. 4, 2013. – С. 267–270/http://www.geoteam.dk/files/manager/gpsnet_whitepapers/vrs_vs_fkp_2003.pdf
9. **Wübbena, G.** PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks [Электронный ресурс] / G. Wübbena, M. Schmitz, A. Bagge // Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2005), Long Beach, CA, сент. 2005. – С. 2584–2594. – http://cors-tr.iku.edu.tr/AutoPlay/geopp_pdf/ion2005_fw_tr.pdf
10. **Wübbena, G.** RTCM Message Type 59 – FKP for transmission of FKP. Version 1.1 [Электронный ресурс] / G. Wübbena, A. Bagge; Geo++GmbH. – 2006. – <http://www.geopp.de/download/geopp-rtcm-fkp59-1.1.pdf>
11. **Brown, N.** Advances in ambiguity resolution for RTK applications using the new RTCM V3.0 master-auxiliary messages / N. Brown et al. // Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2005), Long Beach, CA, сент. 2005. – С. 73–80.
12. **IGS Real-time Service** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://beta.igs.org/rt/products>
13. **Harima, K.** Performance of real-time precise point positioning using MADOCA-LEX augmentation messages [Электронный ресурс] / K. Harima, S. Choy, Y. LI, T. Grinter, M. Choudhury, C. Rizos, Y. Wakabayashi, K. Satoshi // FIG. – http://www.fig.net/pub/monthly_articles/july_2014/harima_et_al.pdf
14. **Chen, K.** Real-time precise point positioning using single frequency data / K. Chen, Y. Gao // Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2005), Long Beach, CA, сент. 2005. – С. 1514–1523.
15. **Van Der Marel, H.** GNSS Solutions: Single- versus Dual-Frequency Precise Point Positioning [Электронный ресурс] / H. Van Der Marel, P. F. de Baker // Inside GNSS. – 2012. – <http://www.insidegnss.com/auto/julyaug12-Solutions.pdf>
16. **Beran, T.** High-accuracy point positioning with low-cost GPS receivers: how good can it get? [Электронный ресурс] / T. Beran, R. B. Langley, S. B. Bisnath, L. Serrano // Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (IONGNSS2005), сент. 13–16, 2005. – С. 1524–1534. – <http://gauss.gge.unb.ca/papers.pdf/iongnss2005.beran.pdf>
17. **Подкорытов, А. Н.** Высокоточное местоопределение в абсолютном режиме в ГНСС с использованием разрешения целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений [Электронный ресурс] / А. Н. Подкорытов // Труды МАИ. – 2011. – Вып. 59 – Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=34845>
18. **Карпик, А. П.** Обзор состояния, использования и развития сетей референчных станций на основе инфраструктуры ГЛОНАСС в России / А. П. Карпик, А. В. Дюбанов, О. В. Твердовский // Интер-экспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр., 10–20 апреля 2012 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 3 т. Т. 1. – Новосибирск: СГГА, 2012. – С.184–190.
19. **Rizos, C.** Precise Point Positioning: Is the Era of Differential GNSS Positioning Drawing to an End? [Электронный ресурс] / C. Rizos, V. Janssen, C. Roberts and T. Grinter // FIG Working Week 2012, Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage. – Rome, Italy, 6–10 мая 2012. – www.fig.net/pub/fig2012/papers/ts09b/TS09B_rizos_janssen_et_al_5909.pdf

20. **Global** Ionosphere Maps Produced by CODE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://aiuws.unibe.ch/ionosphere/#cgim>
21. **Информационный** центр навигационных поправок для пользователей GPS и ГЛОНАСС [Электронный ресурс]. – <http://www.nanotech-express.ru/projects/Navigation/index.html>
22. **IERS** Conventions (2010). Technical Note No. 36 [Электронный ресурс]. – International Earth Rotation and Reference Systems Service. – 2010. – http://www.iers.org/nn_11216/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote36/tn36,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/tn36.pdf
23. **Струков, А. А.** Анализ точности определения векторов сверхдлинных базовых линий по результатам GPS-измерений // Вестник СГГА. – 2011. – Вып. 2 (15). – С. 30–38.
24. **RTKLIB**: An Open Source Program Package for GNSS Positioning [Электронный ресурс]. – <http://www.rtklib.com>
25. Система высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.glonass-svoevp.ru>
26. **UNAVCO** Plate Motion Calculator [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html>

Abstract. Proposals aimed at providing compatibility and complementarity of the RTK and the PPP methods for precise positioning of mobile objects using low-cost GLONASS/GPS equipment are presented. The proposals allow starting wider introduction of the most advanced methods without a need for updates of the existing GNSS ground infrastructure.

Key words: Global Navigation Satellite Systems (GNSS), low-cost equipment, ground infrastructure, absolute method, relative method

Материал поступил 09.09.14