

УДК 621.396; 621.372

**МЕТОД МАКСИМАЛЬНО ИНФОРМАТИВНОЙ ЗОНЫ
ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ БАЗОВОЙ СТАНЦИИ
В КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМАХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ GPS-СЕТЕЙ**

Р.А. Эминов, Х.Г. Асадов

Проанализирован существующий фактический материал по экспериментальной оценке погрешности позиционирования в VRS GPS-сетях, где мобильный приемник обеспечивается виртуальной базовой станцией. Предложен метод высокоинформативной зоны для устранения исходной неопределенности выбора базовых станций в целях построения минимальной GPS-сети, состоящей из трех базовых станций. Даны методические указания и рекомендации по использованию предложенного метода.

Ключевые слова: GPS-приемник, виртуальная базовая станция, кинематические схемы, позиционирование, геодезическая сеть.

Введение

Концепция сетевых кинематических систем GPS и GNSS возникла в середине 90-х г.г. и бурно развивается в настоящее время [1]. Обычные однобазовые кинематические системы реального времени (RTK) имели ограниченное предельное расстояние, равное 10–20 км. В настоящее время сетевые RTK (NRTK) системы, обладая высокой точностью, позволяют осуществить позиционирование при расстоянии между станциями 70–100 км.

Основными систематическими погрешностями, влияющими на точность мобильного приемника (МП) RTK-систем, являются многолучевость, атмосферные и эфемеридные погрешности [2]. Одним из перспективных путей дальнейшего повышения точности RTK-систем позиционирования можно считать метод создания виртуальной базовой станции (VRS), представляющей собой модель базовой станции (БС), находящейся в непосредственной близости МП. Использование метода VRS позволяет уменьшить погрешности позиционирования, возникающие из-за ошибок многолучевости, ионосферы и тропосферной задержки, а также эфемерид.

Как указывается в работе [3], концепция VRS позволяет осуществлять RTK-позиционирование с точностью 2 см в сетях БС с расстоянием между БС до 32 км.

Согласно [3], основными принципами создания VRS являются следующие:

- данные от сети базовых станций передаются в вычислительный центр;
- данные сети используются для вычисления моделей ионосферных, тропосферных и орбитальных погрешностей;
- неоднозначность оценки фазы несущего сигнала фиксируется с учетом базовых расстояний сети;
- фактические ошибки базовых расстояний определяются с сантиметровой точностью на основе измерения фиксированной фазы несущего сигнала;
- для предсказания суммарных погрешностей позиционирования мобильного приемника пользователя используется линейная комбинация моделей погрешностей;
- VRS создается в непосредственной близости от мобильного приемника;
- данные VRS передаются пользователю в стандартных форматах (RTCM).

Как будет показано далее, до сих пор открытым остается вопрос об обоснованном выборе места VRS в RTK-сети, а также вопрос о выборе БС для позиционирования мобильного приемника МП пользователя. До сих пор используются такие эвристические критерии, как «максимально близкие к мобильному приемнику БС» и «максимально близкое размещение VRS к мобильному приемнику».

Далее авторами рассматриваются вопросы замены эвристических критериев на информационные критерии.

Критический обзор существующих методов

Как сообщается в работе [4], в NRTK-системах расстояние между БС и мобильным приемником определяется в виде максимального радиуса круга, охватывающего зону, где сигнал соответствующей БС может быть использован эффективно совместно с посылками формата Международной радиотехнической комиссии морской службы (RTCM) (рис. 1).

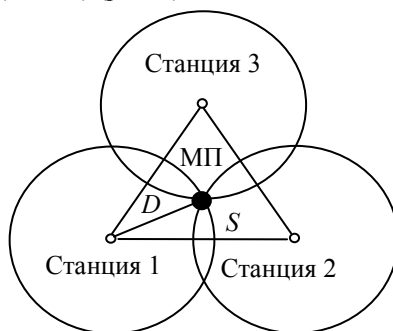


Рис. 1. Идеально симметричная конфигурация расположения МП и базовых станций [4]

В идеально симметричном случае имеет место следующее соотношение:

$$D = 0,5774S,$$

где D – расстояние между БС и МП пользователя; S – расстояние между БС. Согласно [4], погрешность позиционирования RTK GPS-сетей является линейно-возрастающей функцией D . Как сообщается в работе [5], в системе ROMPOS (Румыния) типа NRTK-системы высокая точность позиционирования достигается следующим образом. Сначала МП передает свои приблизительные данные о своей позиции в центр управления через Интернет. Центр управления на базе принятой информации выбирает БС, наиболее близкую к МП, в качестве основной. Далее первичная информация, полученная с этой БС, корректируется в виде геометрической позиции с учетом сетевой коррекции, соответствующей приблизительной позиции МП.

В настоящее время существуют такие конкурирующие технологии, как NRTK с VRS, NRTK с псевдо-базовой станцией (PRS), метод параметров коррекции по участку (FKR), а также концепция «хозяин-помощник» (MAC) и индивидуализированные коррекции такого же типа (i-Max) [6].

Согласно работе [7], оператор сети VRS должен выполнить следующие шаги:

1. определить атмосферные и орбитальные погрешности с сантиметровой точностью путем решения проблемы неоднозначности базовых расстояний в пределах сети;
2. моделировать позицию VRS, используя данные БС, расположенной наиболее близко к МП;
3. интерполировать погрешность сети в зоне расположения VRS, используя линейные или более сложные модели;
4. передать данные коррекции МП в реальном времени.

В отличие от концепции VRS NRTK, в методе MAC все данные коррекции передаются от сети к мобильному источнику в компактной форме с четким выделением различий коррекции для дисперсивных и недисперсивных полей применительно к каждой паре спутник–приемник. При этом мобильный приемник MAC GPS имеет возможность использовать более сложные интерполяционные алгоритмы для определения своей позиции, в то время как МП VRS вынужден «довериться» результатам вычисления его позиции в сервере сети.

Как сообщается в работе [8], для того чтобы использовать быстрое статическое или, в реальном времени, кинематическое (RTK) позиционирование с сантиметровой точностью на больших дистанциях, в некоторых частях Германии были развернуты сети опорных GPS-станций с шагом 30–50 км. В пределах этих сетей были смоделированы значения погрешностей, зависящих от расстояния, таких как погрешности из-за ионосферной и тропосферной рефракции и др., отдельно по спутникам с высоким временным разрешением. Такая процедура приводит к концепции VRS, выходная информация с которых фактически вырабатывается на компьютере, используя для этого данные реально существующих БС.

Как указывается в работе [8], одним из методов использования полного информационного содержания одновременно проводимых наблюдений на нескольких опорных станциях является их комбинирование таким способом, чтобы на VRS было сформировано оптимальное множество кодовых и фазовых измерений, пригодных для определения позиций мобильного приемника.

Согласно работе [9], для того чтобы результаты измерений фазы несущей частоты, полученные в БС сети, были трансформированы в смоделированный результат измерения фазы несущей частоты VRS, должен быть осуществлен ряд операций, к которым относятся следующие:

1. исключение неоднозначности, возникшей из-за двойного дифференцирования фазы несущей частоты;
2. вычисление моделей погрешностей, зависящих от расстояния:
 - ионосферная модель, основанная на линейной ионосферной комбинации;
 - геометрическая модель, содержащая тропосферные и орбитальные погрешности и основанная на линейной комбинации.

При этом обработка данных может быть осуществлена на центральном вычислителе, или может быть распределена между центральным вычислителем и пользователями.

Как указывается в работе [10], в сетевых RTK-системах позиционирования наиболее критической компонентой погрешности позиционирования является дифференциальная ионосферная остаточная погрешность между сетью опорных станций и мобильным приемником.

Согласно работе [11], концентрация электронов в ионосфере подвержена сильному суточному изменению. При этом, как сообщается в работе [12], после двойного дифференцирования тропосферные погрешности при межбазовых расстояниях 60–80 км могут превосходить ионосферные погрешности и достигать величины 2 см за 30-секундный временной интервал. Вместе с тем, вопрос выбора места создания VSR в мировой практике решается до сих пор по следующим эвристическим соображениям:

1. VSR должен быть расположен максимально близко к мобильному приемнику пользователя;
2. для позиционирования мобильного приемника должны быть выбраны те БС, которые максимально близки к мобильному приемнику.

Однако логика развития техники и технологии такова, что эвристические подходы к решению тех или других задач с появлением соответствующей теоретической базы должны быть заменены на научно обоснованные подходы к решению задач. Предпосылками для создания научной базы являются следующие хорошо известные положения техники GPS RTK-позиционирования.

1. Погрешность позиционирования базовых станций, интерполируемая в сети, имеет тренд увеличения с ростом расстояния от БС до мобильного приемника.
2. Погрешность позиционирования БС имеет как шумоподобные дисперсивные ионосферные составляющие, так и систематические (тропосферные, орбитальные и др.) составляющие [11, 12].
3. Доминирование шумоподобной ионосферной погрешности и ее дисперсивность (пространственная неоднородность) позволяют считать, что информация о погрешности позиционирования БС передается к пользователю с уменьшающимся по расстоянию отношением сигнал/шум.

Вышеуказанные положения позволяют ставить и решать задачу оптимального размещения VSR в пределах RTK GPS, с целью повышения информативности системы позиционирования.

Метод максимально информативной зоны для построения VSR

Как указывается в работе [1], при интерполировании погрешности VSR в пределах программного обеспечения сервера погрешности интерпретируются на основе данных окружающих БС с использованием метода интерполяции. При этом возможно также использовать метод экстраполяции (рис. 2).

При осуществлении интерполяции следует учесть свойство линейного увеличения погрешности от расстояния. При этом основными задачами сервера сети являются:

1. генерация данных для определения виртуальной позиции МП;
2. генерация RTCM-данных для виртуальной позиции МП.
3. передача RTCM-данных к МП.

Как нам представляется, интерполяционный метод определения погрешности координат МП в методическом плане исключает возможность осуществления высокоточного позиционирования, так как предполагает постоянное существование погрешности используемого метода – погрешности интерполирования. При этом в данном методе ничего не говорится о том, как следует поступать с погрешностью интерполяции и как извлечь из нее дополнительную информацию о позиции МП.

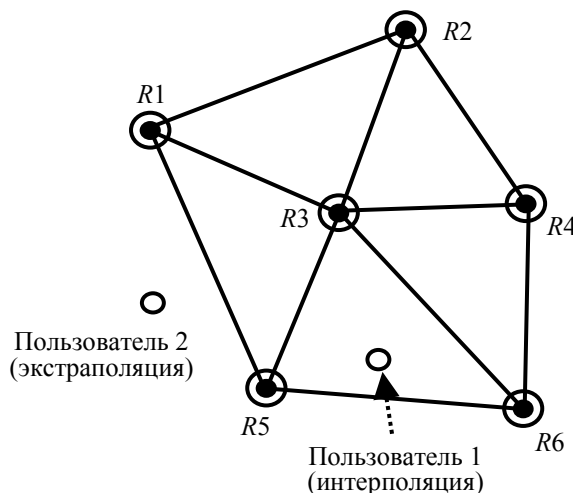


Рис. 2. Случаи необходимости осуществления интерполяции (Пользователь 1) и экстраполяции (Пользователь 2)

С учетом вышесказанного нами предлагается информационно-интерполяционный метод определения погрешности VRS-позиционирования, названный методом высокоинформативной зоны, суть которого заключается в следующем:

1. VRS располагается над МП, т.е. их места позиционирования совпадают;
2. осуществляется интерполирование погрешности и геометрически определяется интерполяционная оценка погрешности позиции VRS (МП);
3. определяется максимально информативная зона в поле расположения VRS (МП), в которой можно было бы принять максимальное количество информации при реализации определенного порядка передачи информации от БС о своей позиции с учетом заданных ограничительных условий;
4. для каждой позиции VRS (МП) в целях интерполирования выбирается такая тройка БС, максимальная информационная зона которых определяет точку размещения VRS (МП).

Получим основные базовые соотношения для предлагаемого метода. Допустим, что имеются шесть БС и МП с неточными координатами (рис. 3). Исходно выбираем станции БС1, БС3 и БС5. С учетом зашумленности сигнала каналов быстроточной составляющей ионосферной погрешности для передачи информации от БС к МП используется многократная посылка данных о собственных позициях.

Таким образом, переходя на непрерывную форму записи, количество информации, принятой в VRS, оценим как

$$F_1 = \int_0^{T_{\max}} M_1 dT = \int_0^{T_{\max}} T \log_2 [\psi(l) + 1] dT, \tag{1}$$

где T – длительность передачи информации от БС к VRS с максимальным значением, равным T_{\max} ; ψ – отношение сигнал/шум в переданной информации; l – расстояние между БС и VRS. $M_1 = T \log_2 [\psi(l) + 1]$.

В первом приближении имеем

$$\psi(l) = \psi_0 + \psi' \cdot l, \tag{2}$$

где ψ_0 – отношение сигнал/шум у базовых станций; $\psi' = \frac{d\psi}{dl}$.

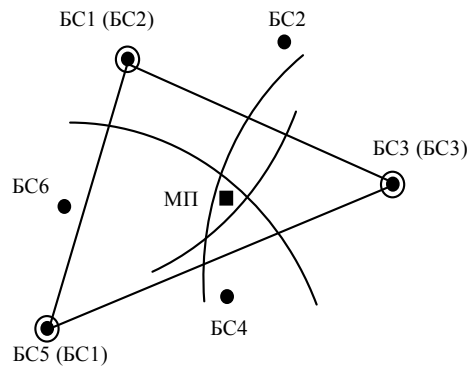


Рис. 3. Графическое пояснение предлагаемого метода высокоинформативной зоны: МП – мобильный приемник; БС1–БС6 – базовые станции исходной сети; (БС1)–(БС3) – базовые станции, используемые в треугольной сети

Введем на рассмотрение функцию связи между расстоянием l и длительностью T :

$$l = \varphi(T), \tag{3}$$

С учетом выражений (1)–(3) получаем

$$F_1 = \int_0^{T_{\max}} M_1 dT = \int_0^{T_{\max}} T \log_2 [\psi_0 + \psi' \cdot \varphi(T) + 1] dT. \tag{4}$$

Введем ограничение на суммарную величину расстояний от МП до БС,

$$F_2 = \int_0^{T_{\max}} M_2 dT = \int_0^{T_{\max}} \varphi(T) dT = C_1, \tag{5}$$

где $C_1 = \text{const}$; $M_2 = \varphi(T)$.

Отметим, что в случае монотонного вида функции (3) выражение (5) можно интерпретировать как ограничение на суммарную длительность приема информации.

С учетом выражений (4) и (5) можно составить уравнение безусловной вариационной оптимизации:

$$F_3 = \int_0^{T_{\max}} T \log_2 [\psi_0 + \psi' \cdot \varphi(T) + 1] dT + \lambda \int_0^{T_{\max}} \varphi(T) dT, \tag{6}$$

где λ – множитель Лагранжа.

Известно, что оптимальная функция $\varphi_{opt}(T)$ удовлетворяет условию Эйлера

$$\frac{d(M_1 + \lambda M_2)}{d\varphi(T)} = 0. \tag{7}$$

С учетом выражений (6) и (7) получаем

$$\frac{T \cdot \psi'}{(\ln 2) [\psi_0 + \psi' \cdot \varphi(T) + 1]} + \lambda = 0. \tag{8}$$

Из выражения (8) находим

$$\varphi(T) = - \left(\frac{\psi_0}{\psi'} + \frac{1}{\psi'} + \frac{T}{\lambda \cdot \ln 2} \right). \tag{9}$$

С учетом выражений (5) и (9) получим

$$- \int_0^{T_{\max}} \left(\frac{\psi_0}{\psi'} + \frac{1}{\psi'} + \frac{T}{\lambda \cdot \ln 2} \right) dT = C_1, \tag{10}$$

откуда нетрудно вычислить

$$\lambda = - \frac{T_{\max}}{2 \cdot \ln 2 \left[\frac{\psi_0}{\psi'} + \frac{1}{\psi'} + \frac{C_1}{T_m} \right]}. \tag{11}$$

С учетом выражений (8) и (11) получим

$$l = \varphi(T) = \frac{2T[\psi_0 + 1 + C_1\psi']}{T_{\max} \cdot \psi'} - \frac{(\psi_0 + 1)}{\psi'}. \quad (12)$$

С учетом отрицательной величины ψ' примем $\psi' = -|\psi'|$. В этом случае уравнение (12) имеет следующий вид:

$$l = \varphi(T) = \frac{\psi_0 + 1}{|\psi'|} - \frac{2T[\psi_0 + 1 - C_1|\psi'|]}{T_{\max} |\psi'|}. \quad (13)$$

Таким образом, при известных значениях $\psi_0, |\psi'|, T_{\max}$, задаваясь линейной шкалой величин T , по выражению (13) можно вычислить значение l .

Далее по составленному множеству значений $\{T_i\}, i = \overline{1,3}$, в котором значения элементов множества подчиняются линейному закону изменения по индексу i , вычисляются соответствующие элементы l_i множества $\{l_i\}, i = \overline{1,3}$. После этого по вычисленным значениям $l_i, i = \overline{1,3}$ осуществляется геометрическое построение искомой высокоинформативной зоны, которая может содержать или не содержать МП.

Рассмотрим эти два случая отдельно.

1. Высокоинформативная зона содержит в себе позицию МП (рис. 4). В этом случае контуры построения высокоинформативной зоны, обозначенные как 1, 2, 3, уплотняются в сторону минимизации площади высокоинформативной зоны с целью уменьшения соответствующих времен $\{T_i\}, i = \overline{1,3}$, приема информации.
2. Если построенная высокоинформативная зона не содержит в себя МП, то возможны два варианта действий:
 1. VRS строится в высокоинформативной зоне, если не ожидается значительное удаление МП;
 2. осуществляется выбор тройки БС, обеспечивающей такое построение высокоинформативной зоны, в котором будет содержаться МП.

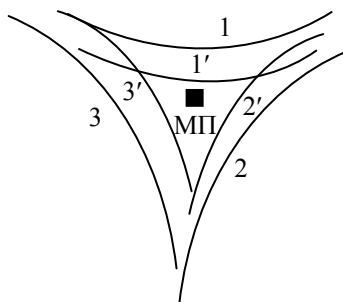


Рис. 4. Порядок уплотнения высокоинформативной зоны

Заключение

Таким образом, введенное в настоящей работе понятие максимальной информативной зоны позволяет устранить исходную неопределенность выбора минимальной сети БС для определения погрешности позиции мобильного приемника методом интерполяции.

Следует отметить, что в данном случае двухкритериальная концепция определения погрешности позиции мобильного приемника (определение по максимальной интерполяционной точности и по максимальному количеству информации) не подчиняется классической концепции многокритериальной оптимизации, так как здесь отсутствует антагонизм критериев, и выполнение требований по одному из критериев в пределе означает автоматическое выполнение требований другого критерия.

Основные выводы и положения проведенного исследования можно сформулировать следующим образом.

1. Систематизирован существующий фактический материал по экспериментальной оценке погрешности позиционирования в VRS GPS-сетях, где мобильный приемник обеспечивается виртуальной БС.
2. Предложен метод высокоинформативной зоны для устранения исходной неопределенности выбора БС для построения минимальной GPS-сети и дальнейшего позиционирования мобильного приемника пользователя.
3. Даны методические указания и рекомендации по использованию предложенного метода.

Литература

1. Landau H., Vollath U., Chen X. Virtual reference station systems // *Journal of Global Positioning Systems*. – 2002. – V. 1. – № 2. – P. 137–143.
2. Vollath U., Landau H., Chen X., Doucet K., Pagels Ch. Network RTK versus single base RTK understanding the error characteristics // *Proceedings of ION GPS 2002*. – 24–27 September. – Portland, OR, 2002. – P. 2774–2781.
3. Vollath U., Deking A., Landau H., Pagels Ch. Long-range RTK positioning using virtual reference stations. – P. 470–474 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ucalgary.ca/engo_webdocs/SpecialPublications/Kis%2001/PDF/0802/PDF, свободный. Яз. англ. (дата обращения 30.10.2012).
4. Feng Y., Wang J. GPS RTK performance characteristics and analysis // *Journal of Global Positioning Systems*. – 2008. – V. 7. – № 1. – P. 137–143.
5. Badesku G., Stefan O., Badesku R., Ortelecan M., Veres S.I. Positioning system GPS and RTK VRS type, using the Internet as a base a network of multiple stations // *FIG Working Week 2011, Bridging the Gap between Cultures Marrakesh, Morocco*. – 18–22 May. – 2011. – P. 1–11.
6. Takac F., Zelzer O. The relationship between network RTK solutions MAC, VRS, PRS, FKP and i-MAX // *Proceedings of ION GNSS 2008*. – Savannah, GA. – P. 348–355.
7. Janssen V. A comparison of the VRS and MAC principles for network RTK // *International Global Navigation Satellite Systems Society. – IGNSS Symposium 2009, Holiday Inn Surfers Paradise, Old, Australia, 1–3 December, 2009*. – P. 1–15 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ecite.utas.edu.au/60284/1/2009_Janssen_IGNSS2009_proceedings_version.pdf, свободный. Яз. англ. (дата обращения 25.10.2012).
8. Wanninger L. The performance of virtual reference stations in active Geodetic GPS-networks under solar maximum conditions // *Proc. of ION GPS'99*. – Nashville TN, 1999. – P. 1419–1427.
9. Wanninger L. Improved ambiguity resolution by regional differential modeling of the ionosphere // *Proc. of ION GPS'95*. – 1995. – P. 55–62.
10. Landau H., Vollath U., Chen X. Virtual reference stations versus broadcast solutions in network RTK – advantages and limitations, *GNSS, Graz, Austria, April, 2003*. – P. 1–15 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gootechmabna.com/catalogues/Papers/3sencore/15.pdf>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 21.11.2012).
11. Wu S., Zhang K., Silcock D. Magnitudes and temporal variations of the tropospheric and ionospheric errors in GPSnet // *Journal of Global Positioning Systems*. – 2010. – V. 9. – № 1. – P. 61–67.
12. Wu S., Zhang K., Yuan Y., Wu F. Spatio-temporal characteristics of the ionospheric TEC variation for GPSnet-based real-time positioning in Victoria // *Journal of Global Positioning Systems*. – 2006. – V. 5. – № 1–2. – P. 52–57.

- Эминов Рамиз Ахмет оглы* – Азербайджанская государственная нефтяная академия (г. Баку), кандидат технических наук, доцент, eminovramiz@mail.ru
- Асадов Хикмет Гамид оглы* – НИИ аэрокосмической информатики (г. Баку), доктор технических наук, доцент, начальник отдела, asadzade@rambler.ru