

УДК 550.388.2

О ДИАГНОСТИКЕ ИОНОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОЧАСТОТНЫХ ПРИЕМНИКОВ GPS

О.А. Горбачев, В.Б. Иванов, П.В. Рябков

ABOUT DIAGNOSTICS OF THE IONOSPHERE WITH USING GPS SINGLE-FREQUENCY RECEIVERS

O.A. Gorbachev, V.B. Ivanov, P.V. Rjabkov

Статья освещает возможность и результаты предварительного анализа диагностики параметров ионосферы с использованием первичных данных, полученных с помощью одночастотных приемников GPS.

The article demonstrates the ability and results of preliminary analysis of ionosphere parameter research with use of primary data provided by GPS single-frequency receivers.

Введение

Исследование ионосферы как среды распространения радиоволн получает в настоящее время новую мотивацию в связи с ее ролью в определении качества спутниковой навигации. Речь идет как о влиянии ионосферы на точность определения координат и скоростей объектов, так и о сбоях в работе спутниковой навигационной системы (СНС) в целом. Перспективным представляется использование для диагностики ионосферы технических средств самой СНС – бортовых спутниковых передатчиков и наземных приемников.

Пионерскими работами в этом направлении следует считать исследования, проводящиеся группой профессора Э.Л. Афраймовича в Институте солнечно-земной физики СО РАН [1, 2]. Методика работ основывается на анализе данных о групповом и фазовом времени распространения радиоволн между спутником и наземным приемником, содержащем информацию о полном электронном содержании (ПЭС) вдоль траектории, соединяющей передатчик и приемник. В качестве исходных данных группой используются так называемые RINEX-файлы, получаемые сетью базовых станций системы GPS и свободно публикуемые в Интернете. Такие файлы генерируются программным обеспечением двухчастотных приемников базовых станций. Именно использование двухчастотных приемников дает возможность получать в чистом виде ионосферную поправку к времени распространения, пропорциональную ПЭС. При таком подходе указанной группе сибирских ученых удалось выявить, в частности, ряд особенностей нестационарных процессов в ионосфере. В то же время использование данных базовых станций имеет свои минусы. Во-первых, в штатном режиме RINEX-файлы генерируются с периодичностью не менее 15 с, что ограничивает рассмотрение быстрых процессов. Во-вторых, мировая сеть базовых станций GPS крайне неравномерно распределена по земной поверхности, в результате чего огромные территории оказываются ею неохваченными.

В этой связи выглядит перспективной попытка использовать для проведения соответствующих исследований недорогие одночастотные приемники GPS. С их помощью можно было бы производить необходимые измерения с дискретностью до 1 с,

создавать мобильные многопозиционные измерительные сети. Идея, разумеется, не является оригинальной, но, в силу ряда причин, достаточно успешных реализаций до сих пор не получила. Одна из этих причин состоит в существенно меньшей точности определения, например, группового запаздывания в одночастотном режиме. Впрочем, нельзя не упомянуть достаточно интересные результаты, представленные в этом направлении в работе [3], относящиеся к диагностике регулярных вариаций ионосферных параметров.

Настоящая статья посвящена результатам предварительного анализа возможностей диагностики нестационарных процессов в ионосфере именно одночастотными приемниками.

Обоснование возможности диагностики ионосферы с помощью GPS

Одночастотные навигационные приемники GPS имеют возможность регистрировать так называемую псевдодальность PR и фазу несущей PH , которые в дальнейшем будем называть первичными данными. В несколько упрощенном виде под термином псевдодальность понимается произведение скорости света в вакууме c на длительность интервала времени t от момента излучения сигнала спутником, зафиксированного в практически абсолютно точном системном времени GPS, до момента приема сигнала приемником, зафиксированного в его менее точном собственном времени [4]:

$$PR = ct. \quad (1)$$

Истинный групповой путь L_g , как известно, определяется следующей формулой:

$$L_g = \int_A^B \frac{dl}{n(l)}. \quad (2)$$

Здесь интегрирование ведется вдоль траектории распространения от приемника A до передатчика B , $n(l)$ – показатель преломления в текущей точке траектории. В ионосфере, как в плазменной среде, на высоких частотах показатель преломления определяется выражением

$$n(l) = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2(l)}{\omega^2}}, \quad (3)$$

где ω – циклическая рабочая частота, ω_p – плазменная (ленгмюровская) частота, зависящая только от концентрации электронного газа в данной точке. Поскольку рабочая частота в системе GPS примерно на два порядка превышает максимальную плазменную частоту в ионосфере, корень в (3) и дробь в (2) можно разложить по малому параметру – отношению квадратов частот. Тогда групповой путь можно представить в виде

$$L_g = L_0 + \Delta L. \quad (4)$$

Здесь L_0 обозначает геометрический путь, а ΔL представляет собой малую ионосферную поправку. При этом следует подчеркнуть, что на столь высоких частотах траекторию можно считать прямой, так что геометрический путь есть не что иное, как длина прямолинейного отрезка, соединяющего спутник и приемник.

Для нахождения фазового пути (через фазу несущей PH) в формуле (2) следует заменить деление на показатель преломления умножением. Тогда, снова используя разложение по малому отношению квадратов частот, можно представить фазовый путь L_f в форме

$$L_f = L_0 - \Delta L. \quad (5)$$

Из соотношений (4) и (5) следует принципиально важный вывод о том, что из данных идеального приемника, определяющего групповой и фазовый путь, сразу же можно было бы установить истинное расстояние между приемником и спутником $L_0 = (L_g + L_f)/2$ и, что для нас наиболее важно, ионосферную поправку $\Delta L = (L_g - L_f)/2$.

Реальная ситуация существенно отличается от идеальной. Во-первых, приемник фиксирует не абсолютное значение набега фазы вдоль траектории, а только соответствующую величину, определенную с точностью до постоянного для данного сеанса наблюдений слагаемого. Вследствие этого речь не может идти об определении истинной дальности. В то же время если интересоваться не абсолютным значением ионосферной поправки, а ее временными вариациями, то таковые из последнего соотношения, казалось бы, должны легко определяться. Во-вторых, следует напомнить, что в измеряемую псевдодальность и фазу несущей входит слагаемым произведение скорости света на ошибку хода часов приемника относительно часов спутника. Впрочем, последнее обстоятельство не является критическим, так как встроенное программное обеспечение GPS-приемника должно фиксировать ошибку хода часов самостоятельно. Как известно, для решения навигационной задачи приемник должен определить псевдодальности одновременно до 4 спутников [5]. В этом случае программным обеспечением приемника решается система из четырех уравнений относительно четырех неизвестных – трех координат и сдвига часов. Таким образом, сдвиг часов теоретически можно считать известным. Кроме того, если рассматривать ионосферную поправку как разность псевдодальности и фазы несущей (приведенной,

разумеется, к размерности фазового пути), то в этой разности сдвиг часов взаимно исключается.

Аппаратно-программное обеспечение задачи

Необходимо остановиться на аппаратно-программных средствах, с помощью которых были получены представленные далее результаты. В качестве рабочих инструментов были опробован ряд приемников фирмы GARMIN – недорогих и широко распространенных аппаратов. Авторами было обнаружено только 4 программы, доступные в Интернете и обеспечивающие загрузку данных по псевдодальностям и фазе несущей с указанных приемников в персональный компьютер. Причем две из них свободно распространяемые, а две другие – условно-бесплатные. Как показали проведенные исследования, наиболее надежный и удобный интерфейс реализуется для приемников GARMIN GPS III+ и GARMIN GPS V и программного комплекса ASYNC/GAR2RNX, разработанного профессором Antonio Tabernero Galan. Поскольку режим извлечения указанных данных не является штатным для обычных приемников GPS, то при других сочетаниях аппаратов, их встроенного программного обеспечения и внешних программ были выявлены явно ошибочные или неподдающиеся интерпретации результаты.

Комплекс ASYNC/GAR2RNX состоит из двух программ. Первая в режиме реального времени считывает с приемника временной ход разнообразных параметров и сохраняет их в бинарном файле. Вторая программа в режиме постобработки генерирует из бинарного файла выходные данные в виде RINEX-файла, содержащего в том числе ежесекундные отсчеты псевдодальности и фазы несущей (с точностью до постоянного слагаемого).

В качестве примера приведем фрагмент RINEX-файла:

```
06 04 14 09 52 50.0252853 0 5G 5G15G18G21G22
32060597.544 8 19654397.941 8
29483836.595 9 17610109.011 9
28349293.958 7 15584448.088 7
31405851.545 8 18097212.021 8
28090652.996 6 14211081.172 6
06 04 14 09 52 51.0253029 0 5G 5G 9G15G18G21
32065156.148 8 19678353.190 8
28126093.656 7 23239102.289 7
29489625.810 9 17640535.303 9
28354779.380 7 15613276.059 7
31411774.530 8 18128337.141 8
06 04 14 09 52 52.0253205 0 5G 5G 9G15G18G21
32069714.328 8 19702308.470 8
28131444.461 7 23267223.965 7
29495415.169 9 17670961.975 9
28360264.371 7 15642104.394 7
31417697.318 8 18159462.353 8.
```

В примере показаны три последовательных блока, генерируемые в системе с частотой 1 Гц. Первая строка блока содержит две последние цифры года, номер месяца, день месяца, час, номер минуты и секунду с дробной частью. Далее в этой строке отображается количество зафиксированных спутников и их номера. Затем в блоке следует ряд строк, соответствующих каждому из спутников, в которых

представлены псевдодальность, десятибалльная градация уровня сигнала от спутника, фаза, выраженная в количестве длин волн (с точностью до некоторого постоянного для данного сеанса произвольного слагаемого), и снова уровень сигнала.

Результаты эксперимента и их анализ

На рис. 1 представлен пример временного хода разности между вариациями относительно начального момента времени псевдодальности и фазы несущей, пересчитанной в вариации фазового пути. Длительность отображенного сеанса измерений составила 10 мин.

Как указывалось выше, эта разность показывает удвоенные временные флуктуации ионосферной поправки, выраженные в единицах длины. По достаточно надежным моделям ионосферы можно оценить типичные значения полной ионосферной поправки для различных условий. Эта поправка может составлять единицы метров в ночных условиях и достигать величины порядка сотен метров днем. Из рис. 1 видно, что измеренная ионосферная поправка испытывает флуктуации в несколько десятков метров за характерные времена порядка десятков секунд. Такая ситуация представляется весьма неожиданной. Напомним, что речь идет о проинтегрированной по всей толще ионосферы величине полного электронного содержания. Представленные на рис. 1 быстрые вариации ПЭС, сравнимые по величине с его средним значением, кажутся маловероятными. В этой связи оказалось важным проверить, не содержат ли измеренные значения псевдодальности или фазы (или и того и другого) ошибок в виде существенного аппаратного шума.

Для выяснения этого вопроса было выполнено отделение нерегулярных вариаций PR и PH от регулярного хода. Дело в том, что нерегулярные флуктуации весьма малы по сравнению с регулярным ходом (прежде всего обусловленным уходом часов приемника), так что визуально, при графическом представлении информации, они не различимы. Для выделения регулярного тренда по трем точкам – началу, середине и концу интервала наблюдений – выполнялась квадратичная (параболическая) аппроксимация. Поведение вариаций псевдодальности и фазового пути после удаления тренда показано на рис. 2. Здесь кривая 1 соответствует групповому, а кривая 2 – фазовому пути (для удобства отнормированному). Видно, что изменения фазы представлены вполне гладкой кривой, в то время как псевдодальность испытывает сильные быстрые нерегулярные изменения.

Рисунок убедительно демонстрирует тот факт, что за быстрые флуктуации отвечает именно псевдодальность. Имеются следующие альтернативы. Первая заключается в том, что псевдодальность действительно содержит интенсивный шум, маскирующий истинные вариации, связанные с ионосферной поправкой. При этом необходимую ионосферную информацию в чистом виде содержит только фаза несущей, а флуктуации, содержащиеся в ней, малы и являются существенно более низкочастотными. Вторая альтернатива предполагает, что

измеренные вариации псевдодальности отражают реальную ситуацию. В этом случае необходимо считать, что временной ход фазы представляется приемником со сглаживанием или частотной фильтрацией. Проблема выбора из этих альтернатив была решена путем одновременных измерений первичных данных на двух идентичных приемниках, расположенных в одном месте. Визуальное сравнение временных зависимостей псевдодальностей для двух аппаратов не выявило сколько-нибудь заметного подобия процессов. Корреляционный анализ выявил некоторую слабую корреляцию. В редких случаях корреляции были более существенными. При этом и визуально на графиках, подобных представленному на рис. 1, наблюдались определенные квазирегулярные вариации. Тем не менее, на данном этапе измерения разности вариаций фазы и псевдодальности следует признать малопродуктивными. Вывод не является окончательным, поскольку имеются факты, пока трудно объяснимые, которые в будущем могут изменить ситуацию. Речь идет о том, что при подключении двух идентичных приемников к одной внешней антенне временные зависимости указанной разности оказываются практически одинаковыми. Более разумно признать странным как раз то, что при работе на отдельных антеннах коррелированность существенно уменьшается.

На следующем этапе была сделана попытка получения информации об ионосферной поправке из анализа временной эволюции фазы несущей. Как видно из рис. 2, в отличие от псевдодальности, временной ход фазы представляется достаточно гладкой кривой. С одной стороны, это позволяет рассчитывать на то, что в фазовых измерениях отсутствуют или являются относительно малыми аппаратные помехи и ионосферная поправка здесь не «затенена» шумами. Но, с другой стороны, здесь же заключена и серьезнейшая проблема, связанная с необходимостью выделения слабых ионосферных вариаций фазы на фоне очень сильного регулярного тренда. Последний обусловлен изменением геометрического расстояния от спутника до приемника с типичной скоростью порядка сотен метров в секунду. Еще более быстрый тренд связан с относительным уходом времени приемника от системного времени GPS. Как показал анализ получаемых первичных данных, он присутствует как в псевдодальности, так и в фазе. В частности, для определения реальной псевдодальности из ее первичного значения необходимо вычитать указанный сдвиг времени, умноженный на скорость света. Аналогичную процедуру необходимо проделывать и при рассмотрении изменений фазы несущей.

Сдвиг часов в нулевом приближении линейно изменяется со временем. Однако более детальное рассмотрение показывает присутствие в нем нелинейных компонентов и случайных составляющих. Есть основания предполагать, что именно последние являются причиной шумовых вариаций псевдодальности. Что же касается фазы, то здесь делалось следующее. Предпринимались попытки отделения регулярных трендов с помощью удаления из временного хода плавных вариаций, получаемых полиномиальной регрессией.

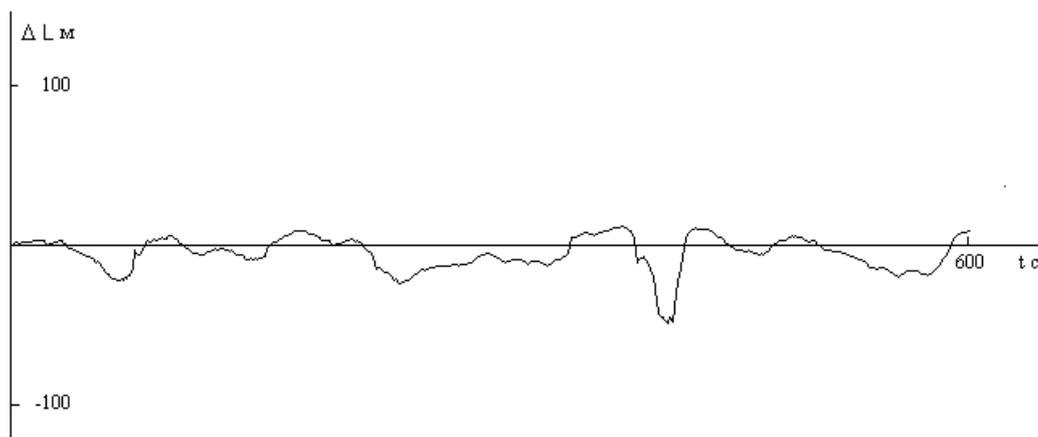


Рис. 1. Вариации фазового пути.

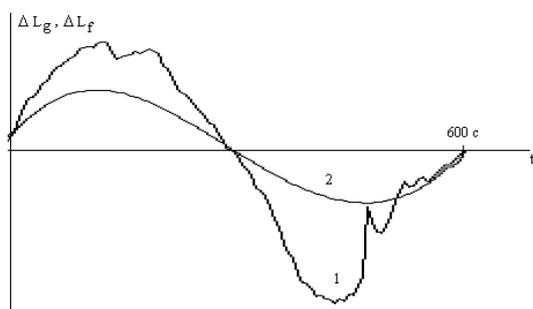


Рис. 2. Поведение вариаций псевдодальности и фазового пути после удаления тренда: 1 – групповой путь, 2 – фазовый путь.

После применения регрессии полиномами достаточно высокой степени «остаточные» вариации могли бы претендовать на роль ионосферной поправки уже к фазовому пути. Однако и эта гипотеза не проходит тест на подобие при обработке данных с двух приемников, работающих с отдельными антеннами. Таким образом, и здесь приходится констатировать тот факт, что методика диагностики ионосферных параметров по первичным данным пока не выработана.

Как уже указывалось, вероятной причиной, препятствующей выявлению необходимой информации, является характер поведения сдвига часов приемника во времени. Представляется целесообразным более подробно рассмотреть проблему.

Прежде всего, отметим, что реальные псевдодальности для видимых спутников лежат в диапазоне от 20 до 25 тыс. километров. Однако из представленного фрагмента RINEX-файла видно, что отобранные значения псевдодальностей выходят за границы этого диапазона. Эвристически нами обнаружено, что реальная псевдодальность получается из отображенной вычитанием дробной части секунды, умноженной на скорость света. Это значит, что сдвиг часов, возможно, следует соотносить именно с дробной частью секунд. Аналогичную коррекцию следует применить и к фазовому пути. Реальный фазовый путь рассчитывается умножением данных из третьего столбца на длину волны и вычитанием поправки сдвига часов. Подтверждением адекватности такой коррекции является то, что результирую-

щие вариации псевдодальности и фазового пути после этого идентичны (разумеется, с соответствующей ошибкой, о которой и идет речь).

Итак, сдвиг часов приемника играет в рассматриваемой задаче первостепенную роль. При детальном рассмотрении временного хода сдвига часов выявляется его совершенно необычное поведение, для иллюстрации которого нами было проведено удаление из временного хода гладкого тренда, выполненное вновь с применением полиномиальной регрессии. Остаточные вариации временного хода $dR(t)$ как функция времени для сеанса длительностью 500 с представлены на рис. 3.

Можно видеть, что рассматриваемая величина испытывает скачкообразные флуктуации, причем, как видно из начального участка графика, величина скачков имеет дискретные и фиксированные градации. Сами же вариации составляют величину в несколько сотен метров, т. е. полностью «покрывают» существенно меньшие ионосферные поправки. Очевидно, данная особенность поведения $dR(t)$ каким-то образом связана с алгоритмом обработки первичных данных во внутреннем программном обеспечении приемника, и ее корректный учет становится основной задачей на следующем этапе исследований. Вероятнее всего, указанное поведение временного хода сдвига часов приемника обусловлено оперативной скачкообразной коррекцией шкалы времени приемника.

Выводы

Несмотря в некотором смысле на негативный характер представленных выше предварительных ре-

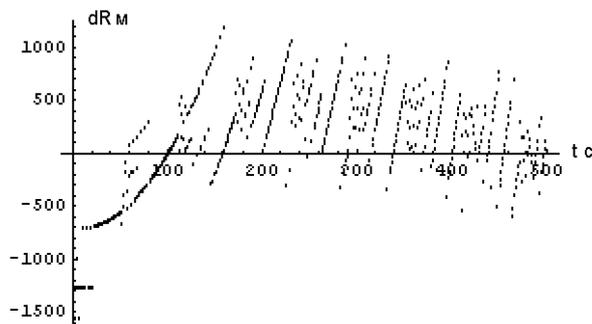


Рис. 3. Остаточные вариации временного хода.

зультатов, нам представляется возможным при проведении дальнейших исследований обеспечить эффективное использование фазовых и псевдодальномерных первичных данных, полученных на одночастотных приемниках GPS, для решения задач диагностики среды распространения сигналов, а следовательно, и для повышения точности позиционирования в системе GPS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афраймович Э.Л., Косоголов Е.А., Лесюта О.С., Ушаков И.И. Спектр перемещающихся ионосферных возмущений по данным глобальной сети GPS // Изв.вузов. Радиофизика. 2001. Т. XLIV, № 10. С. 828–839.

2. Афраймович Э.Л., Лесюта О.С., Ушаков И.И. Геомагнитные возмущения и функционирование навигационной системы GPS // Геомагнетизм и аэрномия. 2002. Т. 42, № 2. С. 220–227.

3. Казанцев М.Ю., Фатеев Ю.Л. Определение ионосферной погрешности измерения псевдодальностей в одночастотной аппаратуре систем ГЛОНАСС и GPS // Журнал радиоэлектроники. 2002. № 12.

4. Авиационная радионавигация: Справочник / Под ред. А.А.Сосновского. М.: Транспорт, 1990. 263 с.

5. Соловьев Ю.А. Спутниковая навигация и ее приложения. М.: Эко-Трендз, 2003. 325 с.

Иркутский филиал Московского государственного университета гражданской авиации, aero@ifmgtu.baikal.ru