

Оценка ионосферной задержки с помощью одночастотных приемников ГНСС

А.В. Новиков, А.А. Романов

ОАО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем»

111250, г. Москва, ул. Авиамоторная д. 53

E-mail: novikov.aleksey@gmail.com

В работе предлагается новый метод обработки данных одночастотных наблюдений ГНСС, которые могут быть получены с помощью неспециализированной навигационной аппаратуры. Рассмотрены перспективы применения этого метода. Приводится сравнение результатов применения метода с результатами применения традиционной двухчастотной методики расчета ПЭС.

This paper presents the new method of single frequency GNSS processing. This method supposed to be used on consumer receiver data. The comparison of results obtained with results of traditional dual frequency method of TEC evaluation is stated.

Введение

Ионосферная задержка – величина, связанная с полным электронным содержанием (ПЭС) ионосферы, в первом приближении, через константу, поэтому, в связи с глобальными навигационными системами, можно считать эти два понятия взаимозаменяемыми.

Ионосферная задержка может быть вычислена напрямую из различных комбинаций наблюдений ГНСС. Эти комбинации могут включать кодовые и фазовые наблюдения. Для кодовых наблюдений характерно наличие значительной аппаратной погрешности и высокий уровень шума. В то время как, гораздо более точные, фазовые измерения имеют характер величины, определённой с точностью до константы.

Традиционный метод расчета ПЭС заключается в использовании разности псевдодальностей для двух различных несущих частот. Для получения этих данных требуются дорогостоящие приёмники. В рамках традиционного подхода ПЭС вычисляется вдоль каждого луча визированная на каждый КА, а затем все данные усредняются, чтобы получить одно значение ПЭС. Мы предлагаем изначально искать единственное значение ПЭС, рассчитывая на его основе задержки вдоль лучей визирования. Искомое значение ПЭС получится в результате решения переопределённой системы уравнений, при этом отпадает необходимость использования двухчастотных данных и дорогостоящей аппаратуры.

Методика оценки ПЭС путём минимизации невязок решения навигационной задачи.

Уравнения кодовых наблюдений псевдодальности

Измерение псевдодальности для каждой пары спутник – приёмник эпохи и частоты складывается из трёх слагаемых[1]:

$$P_{i,1}^k = \rho_i^k + I_i^k + c(b_{i,1} + b^{k,1}), \quad (1)$$

здесь i – индекс приёмника;

k – индекс КА;

$P_{i,1}^k$ - псевдодальность на первой частоте;

c – скорость света в вакууме;

$b_{i,1}$ - аппаратная задержка приёмника;

$b^{k,1}$ - аппаратная задержка k-го спутника;

I_i^k - задержка сигнала, вследствие отличия от 1 коэффициента преломления в ионосфере, выраженная в метрах;

$$\rho_i^{k'} = \rho_i^k + c(\Delta t_i - \Delta t^k) + \Delta \rho_{i,trop}^k,$$

где ρ_i^k – геометрическое расстояние (истинная дальность);

Δt_i – ошибка хода часов приёмника i;

Δt^k – ошибка хода часов КА k;

$\Delta \rho_{i,trop}^k$ – задержка сигнала, вследствие отличия от 1 коэффициента преломления в ионосфере, выраженная в метрах;

В ходе предварительной обработки псевдодальностей с использованием навигационных сообщений ГНСС и метеоданных с большой точностью можно компенсировать тропосферную задержку, ошибку хода часов и аппаратную задержку КА. Псевдодальность после предварительной обработки будет иметь вид:

$$\tilde{P}_{i,1}^k = \rho_i^k + c\Delta t_i + cb_{i,1} + I_i^k \quad (2)$$

Уравнение (2) представляется в виде:

$$\tilde{P}_{i,1}^k = \sqrt{(x_i - x^k)^2 + (y_i - y^k)^2 + (z_i - z^k)^2} + c\tilde{\Delta t}_{i,1} + I_i^k \quad (3)$$

где $\tilde{\Delta t}_{i,1} = \Delta t_i + b_{i,1}$,

x,y,z – декартовы координаты.

Простейшая модель ионосферы

Как уже отмечалось выше, практический интерес представляет вертикальное ПЭС (E_v), однако, измеряется, как правило, наклонное (E). Для установления соответствия между двумя этими величинами, можно ввести проекционную функцию, зависящую от высоты спутника над горизонтом:

$$F(z) = \frac{E(z)}{E_v}, \quad (4)$$

$$E_v = E(0).$$

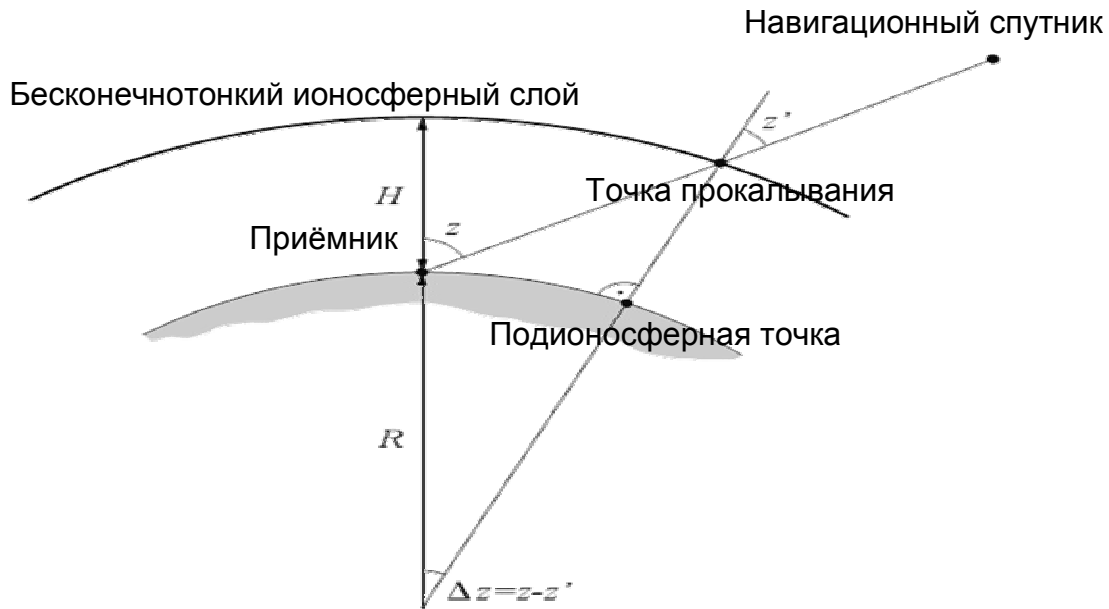


Рис. 1. Приближение бесконечно тонкого ионизированного слоя
(иллюстрация из [1])

Иллюстрация используемой модели приведена на рисунке 1. Предположим, что все свободные электроны заключены в оболочку бесконечно малой толщины, находящуюся на высоте H .

Из рисунка видно, что соотношение между z' – зенитным углом спутника в точке прокалывания ионосферы, и z – зенитным углом приёмника имеет вид:

$$\sin z' = \frac{R}{R+H} \sin z, \quad (5)$$

$R \approx 6371 \text{ км}$ — радиус Земли,

H — высота ионосферного слоя

Для приближения профиля Чапмена, предел $F(z)$ при $\Delta h \rightarrow 0$ приводит к простому виду проекционной функции:

$$F(z) = \frac{1}{\cos z'} = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2 z'}}. \quad (6)$$

Запишем ионосферный член из уравнения (3) в виде:

$$I_i^k = \xi_E E_i^k = \xi_E F(z_i^k) E_v, \quad (7)$$

Будем считать $E_v = \text{const}$ для каждой эпохи и приёмника. $F(z)$ оценивается на основе навигационной информации.

Итак, уравнение (3) принимает вид:

$$\tilde{P}_{i,1}^k = \sqrt{(x_i - x^k)^2 + (y_i - y^k)^2 + (z_i - z^k)^2} + c\Delta\tilde{t}_{i,1} + \left(\frac{\xi_E E_v}{\sqrt{1 - \frac{R}{R+H} \sin^2 z}} \right)_i \quad (8)$$

Уравнение псевдодальности (8) отличается от обычного уравнения псевдодальности наличием ионосферного члена (7). Следовательно, можно положить его дополнительной неизвестной и решать расширенную систему, либо перенести в правую часть и использовать стандартные инструменты решения, варьируя ионосферный член для получения минимальных невязок навигационного решения и истинных координат.

При этом, $\Delta \tilde{t}_{i,1} = \Delta t_i + b_{i,1}$ является одной из неизвестных системы уравнений (8) и её значение определяется в ходе решения.

Результаты применения методики

В качестве иллюстрации применения методики приведём сравнение усреднённого суточного хода ПЭС для станции IGS «yssc» (Южно-Сахалинск) в период с 0 часов 24 июля 2007 года UTC по 24 часа 31 июля 2007 года UTC, полученного по вышеописанной методике и с помощью двухчастотного метода по алгоритму, описанному в [2] (рис 2.).

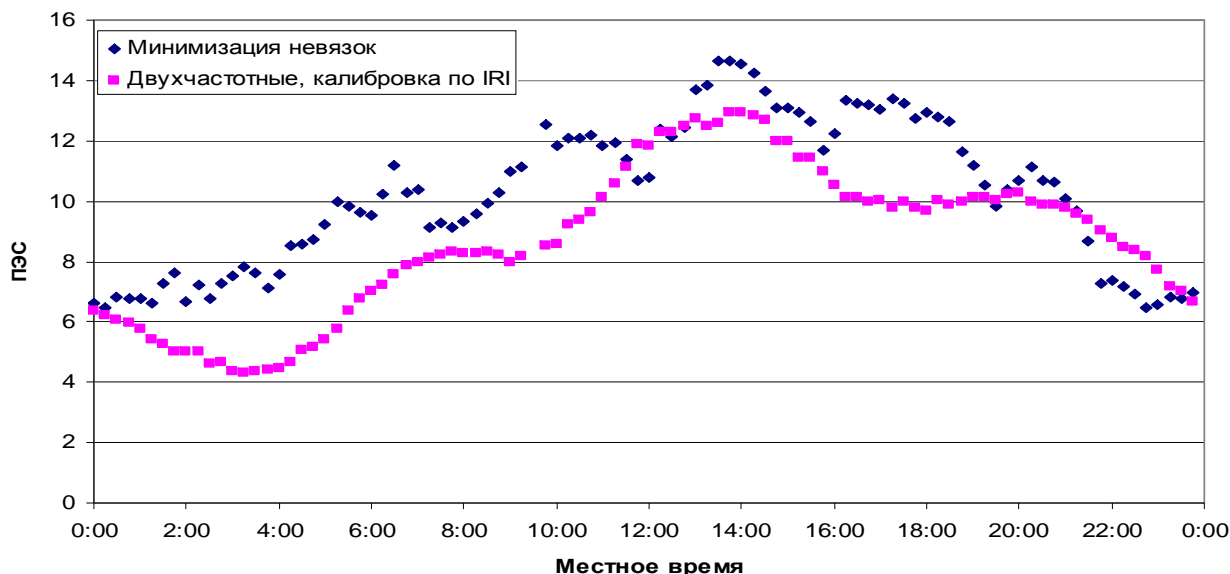


Рис. 2. Пример усреднённого суточного хода ПЭС

Исходные данные для вычисления ПЭС методом минимизации невязок (на рисунке точки отмечены ромбиками) и двухчастотным методом с калибровкой по IRI-2007 (квадратики) взяты из одного источника, поэтому их невязки обуславливаются только различием методов обработки.

На графике видно, что суточный ход данных ПЭС полученные методом минимизации невязок в целом верен, и абсолютная величина ПЭС определяется верно. Средняя невязка для представленных данных составляет 1,84 TECU (точность двухчастотного метода порядка 1 TECU); коэффициент корреляции рядов составил 0,81.

Заключение

В статье предложен метод оценки ПЭС, основанный на подборе наиболее вероятного значения ПЭС в модели тонкой ионосферы с постоянной в пространстве электронной концентрацией. Значение ПЭС, отвечающее минимальной невязке навигационного решения считается наиболее вероятным. Этот подход требует наличия

лишь одночастотных наблюдений псевдодальности (C1), кроме того, автоматически исключает неизвестную задержку в аппаратуре приёмника.

Следовательно, источником данных при описанном методе обработки, может служить сеть, куда входят любые одночастотные (например, бытовые) приёмники ГНСС.

Была проведена верификация данных на основе значений ПЭС, вычисленных по двухчастотным наблюдениям, показана высокая корреляция рядов на фоне значительной невязки значений.

Предложенная методика не претендует на высокую точность определения значения ПЭС, однако, имеет ряд преимуществ перед существующими методами расчета ПЭС. Прежде всего, это простота реализации и возможность использования бытового оборудования в качестве источника данных. С другой стороны, при реализации вышеописанного подхода абсолютное значение ПЭС является достоверным, в отличие от обычных двухчастотных методов.

Литература

1. Schaer, S., 1999. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System. PhD dissertation, Astronomical institute, University of Berne, Switzerland.
2. Новиков А. В., Романов А. А., Романов А. А., Комбинированный алгоритм расчёта пространственного распределения ПЭС по данным радиопросвечивания атмосферы сигналами ГЛОНАСС/GPS и моделирования, Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий, приложение к журналу «Мехатроника, автоматизация, управление», М.:«Новые технологии», 2007, №5 с.24-26.