

Способ коррекции ионосферной погрешности в одночастотной аппаратуре потребителей глобальных навигационных спутниковых систем

В. А. Добриков, А. В. Самофалов

Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

vka@mil.ru

Аннотация. Рассматривается способ повышения точности решения навигационной задачи в одночастотной аппаратуре потребителей глобальных навигационных спутниковых систем на основе оценивания в реальном масштабе времени основного параметра ионосферы, определяющего ионосферную погрешность – полного вертикального электронного содержания и его пространственных градиентов по широте и долготе в месте расположения потребителя. Предлагаемый способ подтверждается результатами моделирования решения навигационной задачи методом калмановской фильтрации

Ключевые слова: аппаратура потребителей, глобальные навигационные спутниковые системы, ионосфера, полное вертикальное ионосферное содержание

I. ВВЕДЕНИЕ

Одной из характеристик глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) является точность решения навигационной задачи. Точность в значительной мере определяется атмосферными погрешностями, к числу которых относят ионосферную погрешность. Основными способами компенсации ионосферных погрешностей в измерениях псевдодальностей в аппаратуре потребителей ГНСС являются двухчастотный и модельный способы.

Двухчастотный способ предполагает проведение измерений на двух несущих частотах и формирование ионосферно-свободных комбинаций

$$R_{\text{IONO FREE}} = \frac{R(f_1)f_1^2 - R(f_2)f_2^2}{f_1^2 - f_2^2},$$

где $R(f_1), R(f_2)$ – измерения псевдодальностей, выполняемые на частотах f_1 и f_2 .

Такой способ устраняет до 90% ионосферной погрешности, однако он требует наличия дорогостоящей двухчастотной навигационной аппаратуры. Кроме этого, двухчастотный способ плохо работает при невысокой точности измерений, что характерно для аппаратуры потребителей ГНСС среднего и низкого классов.

Модельный способ реализуется в нескольких вариантах. Первый вариант предполагает прием открытого C/A сигнала ГНСС GPS, выделение из навигационного сообщения 8-ми коэффициентов ионосферной модели Клобучара и расчет ионосферных погрешностей в соответствии с этой моделью. Этот

вариант коррекции доступен большинству потребителей ГНСС, однако он позволяет компенсировать лишь до 50 % ионосферной погрешности, а иногда и ухудшает точность навигационно-временных определений. Поэтому данный вариант применяется лишь в том случае, когда другие варианты коррекции ионосферной погрешности недоступны.

Второй вариант модельной коррекции основан на использовании модели с параметрами в виде ионосферной сетки, передаваемой в составе навигационного сообщения со спутников широкозонных дифференциальных подсистем (СДКМ, EGNOS и др.). Такой способ коррекции устраняет до 80% ионосферной погрешности, однако он доступен лишь ограниченному числу потребителей ГНСС. Параметры ионосферной сетки так же предоставляются потребителям ГНСС и международными навигационными сервисами, однако доступ к ним требует наличия соответствующих каналов связи и часто предоставляется на коммерческой основе.

В этой связи сделан вывод о недостаточной эффективности и доступности известных способов коррекции ионосферных погрешностей навигационных измерений для задачи высокоточных навигационных определений с использованием одночастотной аппаратуры потребителей.

II. СПОСОБ УСТРАНЕНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ В ИЗМЕРЕНИЯХ ГНСС

В статье предлагается модельный вариант коррекции ионосферной погрешности с оценкой в реальном масштабе времени по измерениям псевдодальностей вертикального полного электронного содержания (ПЭС) в точке расположения одночастотной аппаратуры потребителя. Реализация предлагаемого способа предполагает включение в вектор состояния вертикального ПЭС, оценку этого компонента по измерениям и его пересчета в ионосферные погрешности с последующей коррекцией в измерениях псевдодальностей наблюдаемых навигационных спутников.

В ГНСС псевдодальность определяется через время распространения радиосигнала от навигационного спутника до потребителя

$$R(t_{\text{ПР}}^{\text{ШВП}}) = c\tau(t_{\text{ПР}}^{\text{ШВП}}),$$

$$\tau(t_{\text{ПР}}^{\text{ШВП}}) = T_{\text{ШВП}}(t_{\text{ПР}}^{\text{ШВП}}) - T_{\text{БШВ}}(t_{\text{ИЗЛ}}^{\text{БШВ}}).$$

Если полагать, что момент излучения радиосигнала с навигационного спутника – это одновременно и момент его формирования, а радиосигнал распространяется в свободном пространстве, то при таком определении псевдодальность определяется соотношением

$$R(t_{\text{ПР}}^{\text{ШВП}}) = c(T_{\text{ШВП}}(t_{\text{ПР}}^{\text{ШВП}}) - T_{\text{БШВ}}(t_{\text{ИЗЛ}}^{\text{БШВ}})) = R_{\text{ИСТ}}(t_{\text{ПР}}^{\text{ШВП}}) + R' \quad (1)$$

где $R_{\text{ИСТ}}(t_{\text{ПР}}^{\text{ШВП}})$ – геометрическая дальность между точкой, из которой излучался радиосигнал, и точкой, в которой он принимается; R' – погрешность, обусловленная сдвигом шкал времени спутника и потребителя.

В приемнике формирование оценки псевдодальности основано на измерении момента приема заданной фазы дальномерного кода и расчете ее запаздывания относительно момента формирования той же фазы дальномерного кода на борту спутника, информация о котором извлекается из навигационного сообщения. Определенная таким образом псевдодальность отличается от той, которая определяется выражением (1), что обусловлено рядом физических и технических факторов. Отклонения измеренной псевдодальности от расчетной (1) называют погрешностями определения псевдодальности. Для измеренной псевдодальности можно записать следующее уравнение

$$R = R_{\text{ИСТ}}(t_{\text{ПР}}^{\text{ШВП}}) + R' + c\delta t_{\text{ИОН}} + c\delta t_{\text{ТР}} + c\delta t_{\text{РТЭ}} + c\delta t_{\text{МЛР}} + c\delta t_{\text{ПР}} + \varepsilon_R, \quad (2)$$

где c – скорость распространения ЭМВ в вакууме; $c\delta t_{\text{ИОН}}$ – ионосферная погрешность; $c\delta t_{\text{ТР}}$ – тропосферная погрешность; $c\delta t_{\text{РТЭ}}$ – погрешность, обусловленная релятивистскими и гравитационными эффектами; $c\delta t_{\text{МЛР}}$ – погрешность многолучевого распространения радиоволн; $c\delta t_{\text{ПР}}$ – погрешности, вносимые приемником; ε_R – прочие составляющие погрешности измерения.

Рассмотрим ионосферную погрешность измерения псевдодальности. Относительная диэлектрическая проницаемость ионосферы определяется выражением

$$\varepsilon_{\text{ИОНО}} = 1 - \frac{3190N_e}{\omega^2 + \nu_{\text{ЭФФ}}^2}, \quad (3)$$

где N_e – концентрация электронов, эл/м³; $\nu_{\text{ЭФФ}}$ – эффективная частота столкновения электронов с ионами и нейтральными молекулами.

Для дециметровых и более высоких частот $\nu_{\text{ЭФФ}} \ll \omega$, поэтому выражение (3) принимает более простой вид

$$\varepsilon_{\text{ИОНО}} = 1 - \frac{80,6N_e}{f^2}. \quad (4)$$

Показатель преломления ионосферы определяется выражением

$$n_{\text{ИОНО}}(f) = \sqrt{\varepsilon_{\text{ИОНО}}}. \quad (5)$$

Подставляя (4) в (5), разлагая полученную функцию в ряд, и ограничиваясь двумя первыми слагаемыми, получим выражение для группового показателя преломления, характеризующего меру воздействия ионосферы на кодовые измерения в ГНСС,

$$n_{\text{Г}} \approx 1 + \frac{40,3N_e}{f^2}. \quad (6)$$

Приращение времени групповой задержки огибающей радиосигнала навигационного спутника, находящегося в зените, при прохождении ионосферы определяется выражением

$$\delta t_{\text{ИОНО}} = \frac{40,3}{cf^2} \int_{l_{\text{MIN}}}^{l_{\text{MAX}}} N_e(l) dl = \frac{40,3}{cf^2} I, \quad (7)$$

где l_{MIN} , l_{MAX} – нижняя и верхняя границы ионосферы; $I = \int_{l_{\text{MIN}}}^{l_{\text{MAX}}} N_e(l) dl = \text{VTEC}$ – вертикальное ПЭС в подионосферной точке наблюдаемого спутника.

Перед решением навигационной задачи все погрешности измерения псевдодальностей компенсируются, поэтому представим уравнение измерений кодовых псевдодальностей (2) после коррекции всех погрешностей (кроме ионосферных) в виде:

$$R_j = \rho_j + c\delta t + \frac{40,3M(\beta_j)}{f_j^2} I_j + n_j, \quad (8)$$

где j – номер наблюдаемого навигационного спутника; ρ_j – геометрическая дальность между потребителем и спутником; δt – смещение шкалы времени потребителя относительно системной шкалы времени; f_j – несущая частота сигнала, излучаемого с борта спутника; $I_j = \text{VTEC}_j(\varphi_j, \lambda_j)$ – вертикальное ПЭС в подионосферной точке j -го спутника; $M(\beta_j)$ – функция отображения вертикальной ионосферной задержки на произвольный угол возвышения спутника над горизонтом β_j ; n_j – остаточные погрешности измерения.

Для пространственного описания вертикального ПЭС в локальном регионе расположения потребителя на интервале времени 1–2 часа достаточно аппроксимации полиномом 1-ой степени, зависимостью от времени и вращением Земли с учетом малости интервала наблюдений можно пренебречь. Такая аппроксимация основана на том, что значение ПЭС изменяется во времени и пространстве относительно медленно [3]. С учетом указанных допущений представим функцию, аппроксимирующую вертикальное ПЭС в локальном районе расположения потребителя, в следующем виде

$$I_j = I_0 + I_{\varphi}(\varphi_j - \varphi_0) + I_{\lambda}(\lambda_j - \lambda_0), \quad (9)$$

где φ_0, λ_0 – широта и долгота расположения потребителя; φ_j, λ_j – широта и долгота подионосферной точки j -го спутника; $I_0 = VTEC(\varphi_0, \lambda_0)$ – вертикальное ПЭС в точке расположения потребителя; $I_\varphi = \frac{\partial VTEC}{\partial \varphi}$ – градиент изменения вертикального ПЭС по широте; $I_\lambda = \frac{\partial VTEC}{\partial \lambda}$ – градиент изменения вертикального ПЭС по долготе.

Неизвестные значения вертикального ПЭС в точке расположения потребителя и его градиенты изменения по широте и долготе будем оценивать по измерениям псевдодальностей в ходе решения навигационной задачи. В вектор состояния потребителя наряду параметрами положения, скорости движения и параметрами модели генератора аппаратуры потребителя включаем указанные выше параметры модели ионосферы. Тогда вектор состояния потребителя представляется в виде

$$\vec{X} = [x \ V_x \ y \ V_y \ z \ V_z \ c\delta_t \ \lambda\delta_f \ I_0 \ I_\varphi \ I_\lambda]^T, \quad (10)$$

где $x(k), y(k), z(k)$ – координаты потребителя; $V_x(k), V_y(k), V_z(k)$ – проекции вектора скорости потребителя; $c\delta t(k)$ – уход шкалы времени потребителя; $\lambda\delta f(k)$ – смещение частоты опорного генератора потребителя.

Уход шкалы времени и смещение частоты опорного генератора аппаратуры потребителя в векторе состояния (10) для удобства решения навигационной задачи представлены в метрической мере [2].

В рассматриваемом случае уравнения измерений псевдодальностей (8) являются нелинейными, поэтому для решения навигационной задачи будем использовать расширенный фильтр Калмана [1, 4, 5]. В работе получены частные производные от уравнения измерений псевдодальностей (8) по компонентам вектора состояния потребителя (10), описывающим параметры ионосферы. Указанные частные производные определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_j}{\partial I_0} &= \frac{40.3M(\beta_j)}{f_j^2}, \\ \frac{\partial R_j}{\partial I_\varphi} &= \frac{40.3M(\beta_j)}{f_j^2}(\varphi_j - \varphi_0), \\ \frac{\partial R_j}{\partial I_\lambda} &= \frac{40.3M(\beta_j)}{f_j^2}(\lambda_j - \lambda_0). \end{aligned} \quad (11)$$

Для верификации предлагаемого способа оценки параметров ионосферы и коррекции ионосферных погрешностей использовались архивные файлы сырых кодовых измерений, выполненных в Северо-Западном регионе Российской Федерации в условиях спокойной геофизической обстановки, и бортовых эфемерид в формате RINEX, а также файл с апостериорными данными ионосферной сетки ПЭС на указанную дату. В режиме постобработки по архивным RINEX измерениям и бортовым эфемеридам с помощью разработанного в среде MatLab программного комплекса была решена навигационная задача с использованием описанного выше способа. Для оценки точности расчета экспериментального вертикального ПЭС было рассчитано «эталонное» апостериорное значение вертикального ПЭС в этой точке с использованием апостериорной ионосферной сетки на время и дату проведения навигационных измерений. Результаты проведенного эксперимента приводятся ниже.

На рис. 1 приведены зависимости, характеризующие условия проведения эксперимента и решения навигационной задачи – невязки измерений псевдодальностей.

Графики на рис. 1 характерны для реализации абсолютного режима навигационных определений по кодовым измерениям. Они показывают сходимость и хорошее качество решения навигационной задачи.

На рис. 2 представлены эталонное, полученное с использованием апостериорной ионосферной сетки (красным цветом), и оцененное (синим цветом) фильтром Калмана в ходе решения навигационной задачи, значения ПЭС (ось слева) в единицах TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл/м}^2$) и значения вертикальной ионосферной погрешности измерения псевдодальности (ось справа).

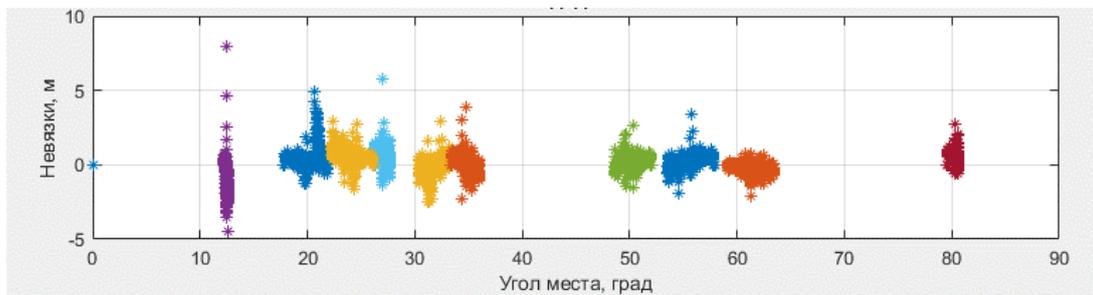


Рис. 1. Невязки измерений псевдодальностей в зависимости от углов возвышения наблюдаемых навигационных спутников

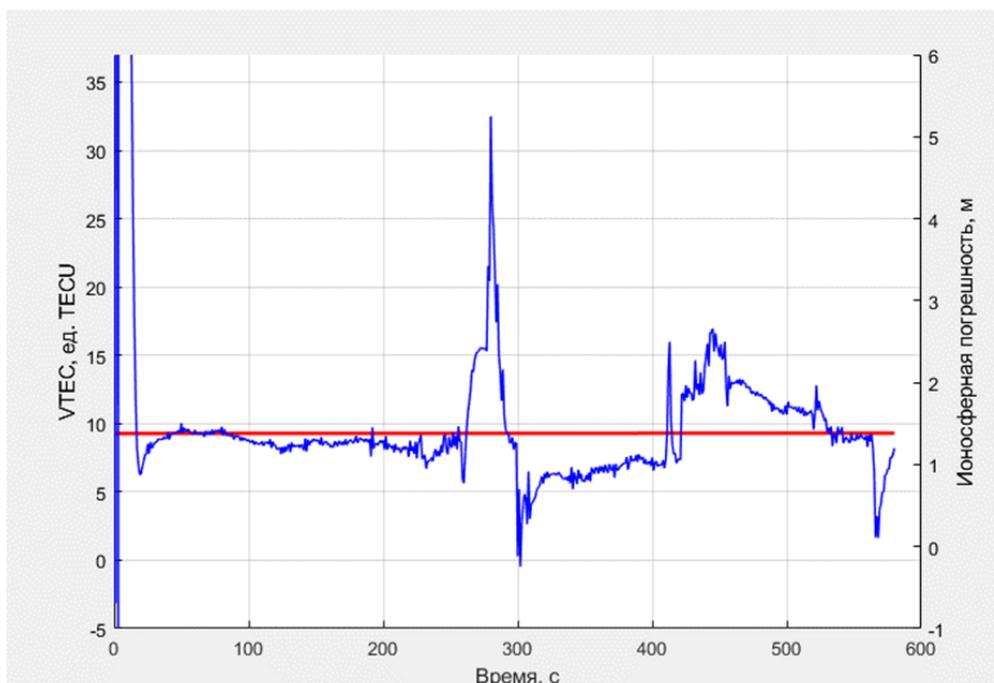


Рис. 2. Эталонное (красным цветом) и оцененное (синим цветом) в ходе решения навигационной задачи (ось слева) и значения расчетной ионосферной погрешности (ось справа)

Анализ графиков на рис. 2 показывает сходимость оценки ПЭС к его эталонному значению. Время сходимости не превышает 10 с. Аномальные выбросы в полученных оценках объясняются сменой состава наблюдаемых навигационных спутников, измерения которых используются для навигационного решения. Оценки ионосферной погрешности близки к эталонным значениям и пригодны для коррекции измерений псевдодальностей.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый в работе модельный способ коррекции ионосферных погрешностей обеспечивает сходимость оценки вертикального ПЭС в точке расположения потребителя к его эталонному значению и возможность коррекции ионосферных погрешностей в измерениях псевдодальностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Grewal, Mohinder S. Kalman filtering: theory and practice using MATLAB / Mohinder S. Grewal. Angus P. Andrews. – Fourth edition. 1. Kalman filtering. 2. MATLAB. I. Andrews. Angus P. II. Title. John Wiley & Sons, Inc. 2015.
- [2] Zucca C., Tavella P. The Clock Model and Its Relationship with the Allan and Related Variances. IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, vol. 52, no. 2, 2005.
- [3] Ионосферное обеспечение средств локации, навигации и связи / В.Ф. Иванов, Т.О. Мысливцев, Е.А. Ткачев, Б.В. Троицкий. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2010. 200 с.
- [4] Калман Р.Е., Бьюси Р.С. Новые результаты в линейной фильтрации и теории предсказания // Техническая механика, т. 83, серия Д, №1, 1961.
- [5] Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1967. 575 с.