

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖКАНАЛЬНОЙ ЗАДЕРЖКИ В КАНАЛАХ ДВУХЧАСТОТНОГО НАВИГАЦИОННОГО GPS ПРИЕМНИКА

д.т.н., проф. В.П. Деденок, Ю.В. Резников

*Приведен метод определения межканальной задержки в двухчастотном навигационном GPS приемнике с использованием глобальных карт распределения ионосферных параметров, формируемых службой IGS.*

**Постановка проблемы.** При решении широкого круга как гражданских, так и военных задач, требуется с высокой точностью определить положение объекта в той или иной системе координат. В большинстве случаев обеспечить требуемую точность позволяет двухчастотный GPS приемник. Это обусловлено тем, что основное влияние на точность определения координат оказывает ионосферная рефракция, т.е. увеличение пути распространения радиосигнала за счет неравномерной плотности распределения заряженных частиц в ионосфере. Так как увеличение пути распространения сигнала обратно пропорционально его частоте, то при приеме на двух частотах ошибка может быть практически полностью скомпенсирована. Однако, элементная база каждого из аналоговых каналов приемника имеет различия, что приводит к различию времен прохождения сигнала через них. Это приводит к возникновению ошибки при определении ионосферной задержки, а соответственно – к ошибке в определении координат. Величина этой ошибки [5] может находиться в пределах 1...30 нс (0,3...9 м). Определение систематической ошибки в аналоговых каналах приемников особенно важно для перманентных или контрольно-корректирующих станций, которые формируют массивы выходной информации о текущем состоянии ионосферы.

Как показал **анализ последних исследований и публикаций** [1, 3, 5], единственным доступным в настоящее время источником получения информации о величине межканальных задержек перманентных GPS станций являются ионосферные карты, которые формируются центром. В результате обработки суточных файлов измерений центр CODE (г. Берн, Швейцария) формирует карты ионосферы, доступные через сеть Интернет [1, 5] с задержкой в четверо суток. Данные карты представляют собой значения интегральной концентрации электронов (Total

Electronic Content – TEC) в вертикальном направлении относительно сетки с шагом  $5^\circ$  по географической долготе и  $2,5^\circ$  по географической широте. При этом гарантируется точность восстановления профиля TEC на уровне десятых долей TECU, что в пересчете на дальность составляет значения нескольких десятков сантиметров.

Значение межканальной задержки двухчастотного приемника является медленноменяющейся величиной и на суточном интервале времени ее можно принять постоянной [5], что позволяет выбрать за основу для оценивания информацию центра CODE. Таким образом, **постановка задачи** заключается в разработке метода определения межканальной задержки двухчастотного приемника с использованием информации международной сети IGS без привлечения внешних аппаратных средств.

**Изложение основного материала исследования.** Входными данными предлагаемого метода являются: *массив значений и среднеквадратических отклонений (СКО) вертикальных TEC на дискретной по широте и долготе сетке в фиксированные моменты времени, сформированный в процессе постсеансной обработки измерений международной сети станций IGS; массив измерений двухчастотного GPS приемника с неизвестным значением межканальной задержки, соответствующий выбранному интервалу времени  $[t_n, t_n+T]$ .*

Для сопоставления этих массивов на моменты времени фиксации измерений GPS приемника должна быть выполнена интерполяция дискретных пространственных и временных отсчетов вертикальных TEC на соответствующие точки пространства и моменты времени. Такая интерполяция осуществляется в три этапа:

- в массиве эталонных данных выполняется обнаружение «базового квадрата», внутри которого находится точка с координатами  $(\varphi_k, \lambda_k)$ , соответствующая подионосферной точке выполненного GPS приемником измерения на момент времени  $(t_j$  и  $t_{j+1})$ , чтобы  $t_j < t_k < t_{j+1}$ ;

- значения TEC в узлах «базового квадрата» интерполируются по времени на момент  $t_k \in [t_j, t_{j+1}]$  с использованием выражения [5]:

$$\Gamma^*(\varphi, \lambda, t) = \frac{t_{i+1} - t}{t_{i+1} - t_i} \Gamma_i^*(\varphi, \lambda) + \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i} \Gamma_{i+1}^*(\varphi, \lambda), \quad (1)$$

где  $t_i$  и  $t_{i+1}$  – моменты времени, на которые отнесены ионосферные карты; данные моменты времени определяют границы интервала, внутри которого находится момент времени фиксирования измерения; осуществляется пространственная интерполяция TEC в узлах квадрата на подионосферную точку с координатами  $(\varphi_k, \lambda_k)$  [5]:

$$I_{0t_k}^* (\varphi_0 + p\Delta\varphi, \lambda_0 + q\Delta\lambda) = (1-p)(1-q)I_{0,0}^* + p(1-q)I_{1,0}^* + q(1-p)I_{0,1}^* + pqI_{1,1}^*, \quad (2)$$

где  $0 \leq p < 1$  и  $0 \leq q < 1$ , а  $\Delta\varphi$  и  $\Delta\lambda$  – величина шага сетки по широте и долготе соответственно.

Общее выражение для интерполяции по времени и пространству

$$I_{0t_k}^* (\varphi_k, \lambda_k) = \sum_{i=1}^4 (C_1(i, j) \cdot I_{ij}^* + C_2(i, j+1) \cdot I_{i,j+1}^*), \quad (3)$$

где  $C_1(i, j)$  и  $C_2(i, j+1)$  – соответствующие веса определения эталонных значений ТЕС, зависящие от времени и географических координат.

Полученное значение представляет собой «эталонный» отсчет вертикального ТЕС  $I_{0t_k}^* (\varphi_k, \lambda_k)$  на фиксированный момент времени, который должен быть пересчитан на наклонную трассу, соответствующую направлению на спутник, относительно которого выполнено измерение

$$I_{ijH}^* (t_0, \varphi_0, \lambda_0) = \frac{I_{ijB}^* (t_0, \varphi_0, \lambda_0)}{\cos Z}, \quad (4)$$

где  $I_{ijH}^* (\Delta\tau_0, t_0, \varphi_0, \lambda_0)$  – оценка ТЕС на наклонной трассе «i-я станция – j-й спутник»;  $Z$  – угол между направлениями «станция – спутник» и от центра Земли до точки пересечения трассы с тонким слоем ионосферы.

Представленным способом формируется массив  $I_{ijH}^*$  «эталонных» данных, значения которого соответствуют измеренным приемником значениям. Данный массив должен сопровождаться массивом дисперсий, которые, исходя из (4), могут быть представлены в виде

$$\sigma_{0k}^2 = \sum_{i=1}^4 ([C_1(i, j)]^2 \cdot \sigma_{ij}^2 + [C_2(i, j+1)]^2 \cdot \sigma_{ij+1}^2) \cdot 1/\cos Z. \quad (5)$$

В результате можно говорить о совокупности опорных (эталонных) данных с известной погрешностью так, что

$$I_{0t_k}^* (\varphi_k, \lambda_k) = I_{0t_k} (\varphi_k, \lambda_k) + \xi_k, \quad (6)$$

где  $I_{0t_k} (\varphi_k, \lambda_k)$  – истинное значение ТЕС в точке  $(\varphi_k, \lambda_k)$  на момент времени  $(t_k)$ , а  $\xi_k$  – случайная (шумовая) ошибка с дисперсией  $\sigma_{0k}^2$ .

Имея «эталонное» значение ТЕС, на соответствующей наклонной трассе может быть рассчитана «эталонная» (модельная) разность оценок псевдодальностей, полученных на частоте  $f_1$  и  $f_2$ :

$$\Delta R_{21}^* = \frac{c \cdot I_{H1}^*}{f_2^2} - \frac{c \cdot I_{H1}^*}{f_1^2} = c \cdot I_{H1}^* \left( \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2 \cdot f_1^2} \right) = \frac{c \cdot I_{H1}^*}{f_1^2} \cdot (1 - \gamma) = \Delta R_{21} + \xi_{ш1}, \quad (7)$$

где  $\Delta R_{21}$  – «истинная» разность псевдодальностей, вызванная ионосферной рефракцией.

Получив оценки псевдодальности  $\hat{R}_{1i}$  и  $\hat{R}_{2i}$  на  $i$ -й трассе на частотах  $f_1$  и  $f_2$  соответственно, формируется их разность

$$\Delta \hat{R}_{21i} = \hat{R}_{2i} - \hat{R}_{1i} = \Delta R_{21i} + \Delta_0 + \eta_{ш1}, \quad (8)$$

где  $\Delta_0 = \Delta_2 - \Delta_1$  – разность задержек сигнала во 2 и 1-м каналах.

Сформировав разность измеренной  $\Delta \hat{R}_{21i}$  и эталонной  $\Delta R_{21i}^*$  задержек, можно получить выражение для расчета межканальной ошибки

$$y_i = \Delta \hat{R}_{21i} - \Delta R_{21i}^* = \Delta_0 + \chi_{ш1}. \quad (9)$$

Для определения оценки величины межканальной задержки  $\hat{\Delta}_0$  необходимо минимизировать функцию

$$F(\hat{\Delta}_0) = \sum_{i=1}^N w_i (\Delta \hat{R}_{21i} - \Delta R_{21i}^*)^2 \rightarrow \min, \quad (10)$$

где  $w_i$  – вес соответствующего слагаемого, пропорциональный точности измерений и эталонных данных.

Как известно [4], минимума функции  $F(\Delta_0)$  можно достичь, приравняв нулю частную производную

$$\frac{\partial F(\hat{\Delta}_0)}{\partial \hat{\Delta}_0} = 0. \quad (11)$$

В результате окончательное выражение для оценки  $\hat{\Delta}_0$ :

$$\hat{\Delta}_0 = \frac{\sum_{i=1}^N w_i (\Delta \hat{R}_{21i} - \Delta R_{21i}^*)}{\sum w_i}, \quad (12)$$

где  $w_i = w_{ш} + w_{эт}$ ;  $w_{ш}$  – величина, обратно пропорциональная дисперсии шума приемника;  $w_{эт}$  – величина, обратно пропорциональная дисперсии оценок эталонных значений.

Дисперсия полученной оценки может быть определена из следующего соотношения

$$\hat{\sigma}_{\Delta_0}^2 = 1 / \sum_{k=1}^N 1 / \hat{\sigma}_{\Delta R_{21}^*}^2. \quad (13)$$

При получении величины  $\Delta \hat{R}_{21}$  может быть использован алгоритм фильтрации скользящим окном. При этом увеличение числа измерений приведет к значительному снижению  $\hat{\sigma}_{\Delta \hat{R}_{21}}$ , что позволяет пренебречь

величиной  $w_{ш}$ . В этом случае вес каждого слагаемого в выражении (12) будет определяться только величиной дисперсии эталонных данных (5).

В результате экспериментальных исследований были получены оценки  $\hat{\Delta}_0$  для ряда станций международной сети IGS, значения межканальных задержек которых были известны априорно. Результаты эксперимента представлены в табл. 1.

Таблица 1

Оценка межканальной задержки

Станция	Оценка IGS, нс	СКО IGS, нс	Оценка, нс	СКО, нс
MDVO	0,178	0,044	0,311	0,0031
LAMA	- 18,011	0,039	- 16,8	0,0023
ANKR	5,24	0,043	6,22	0,0042
JOZE	2,926	0,039	3,16	0,0031
GLSV	- 11,053	0,039	- 10,987	0,0028

**Выводы.** Разработан метод определения межканальной задержки двухчастотного GPS приемника, позволяющий обеспечить точность оценок на уровне десятых долей наносекунд, что позволит с более высокой точностью оценить влияние регулярной составляющей ионосферной погрешности и, соответственно, повысит точность навигационных определений. Значимое практическое применение данный метод может найти в алгоритмах обработки информации в центрах сетей перманентных станций или комплексов дифференциальной спутниковой навигации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.aiub.unibe.ch/ionosphere.html>
2. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): Теорія і практика / Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз. – К.: Наук. думка, 1995. – 380 с.
3. Флерко С.Н., Дейнеко В.Н. Алгоритм предварительной обработки ионосферных линейных комбинаций измерений по сигналам навигационных спутников// Моделирование та інформаційні технології. – К.: ИПМЕ. – Вип. 22. – С. 206 – 210.
4. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. – М.: Сов. радио, 1978. – 384 с.
5. Schaer S. How to use CODE's Global Ionosphere Maps // IGS Position Paper. – IGS Analysis Centers Workshop, May 1997. – 9 p.

Поступила 11.05.2004

**ДЕДЕНОК Виктор Петрович**, докт. техн. наук, профессор, начальник научного центра космических исследований. Окончил ВИРТА ПВО в 1975 году. Область научных интересов – адаптивная обработка информации космических систем.

**РЕЗНИКОВ Юрий Вячеславович**, адъюнкт ХВУ. Окончил ХВУ в 2000 году. Об-

*ласть научных интересов – системы и комплексы спутниковой навигации и геодезии.*