

УДК 550.388.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОГО ЗНАЧЕНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ПО ДАННЫМ ГЛОНАСС

П.В. Татаринов, Ю.В. Ясюкевич, Е.А. Косогоров

VARIATIONS AND ABSOLUTE VALUE OF TOTAL ELECTRON CONTENT AS DEDUCED FROM GLONASS DATA

P.V. Tatarinov, Yu.V. Yasyukevich, E.A. Kosogorov

Исследования ионосферы с помощью GPS ведутся во многих странах мира на протяжении более 10 лет, в то время как подобных работ по данным ГЛОНАСС практически не проводилось по причине малого количества спутников и малочисленной сети приемников ГЛОНАСС. За последние годы спутниковая группировка ГЛОНАСС выросла, и в настоящий момент в нее входят 27 (23 используемых по целевому назначению) спутников (в GPS – 31). Кроме того, сейчас в общем доступе появилось более 300 совмещенных GPS/ГЛОНАСС-приемников по всему миру. Появилась необходимость в специализированном программном пакете, позволяющем обрабатывать данные ГЛОНАСС для получения геофизической информации. В ИСЗФ СО РАН такой пакет был создан. В докладе представлены методы и алгоритмы работы пакета, а также отдельные результаты обработки данных.

For the last 10 years many works devoted to study of the ionosphere using GPS data were published around the world but there were almost not the same works based on GLONASS data. The main reasons were small number of satellites and scarce network of GLONASS receivers. But recently number of GLONASS satellites has been grown considerably and comes to 27 (23 used for positioning) (for GPS is 31). In addition now there are more than 300 mixed GPS-GLONASS receivers which data shared in Internet. So specialized program complex for GLONASS data to be processed to gain geophysical information is needed. Such a complex was created in ISTP SB RAS. Methods and algorithms of the complex and some results of data treatment are presented.

Введение

Восстановление полного электронного содержания (ПЭС) с целью мониторинга природных и техногенных воздействий на ионосферу и процессы, происходящие в ней, ведется уже больше десятилетия. В подавляющем большинстве случаев для этого используются данные спутниковой радионавигационной системы (СРНС) GPS. Между тем, орбитальная группировка СРНС ГЛОНАСС интенсивно развивается, растет парк аппаратуры пользователей, способной принимать сигналы обеих систем. Использование данных СРНС ГЛОНАСС позволит повысить надежность восстановления ПЭС и разрешающую способность по пространству. Кроме того, использование в СРНС ГЛОНАСС частотного разделения каналов повышает помехозащищенность и, как следствие, вероятность успешного восстановления ПЭС. Поэтому использование данных СРНС ГЛОНАСС для исследования ионосферы представляется необходимым и весьма перспективным.

Особенности восстановления ПЭС по данным СРНС ГЛОНАСС

Первой особенностью восстановления ПЭС по данным ГЛОНАСС является учет номера частотного канала в выражениях (1) и (2) [ГЛОНАСС ..., 2005]:

$$I_i(TECU) = -\frac{1}{40.308} \frac{f_{1m_i}^2 f_{2m_i}^2}{f_{1m_i}^2 - f_{2m_i}^2} \times [(P1_i - P2_i) + nP_i]; \quad (1)$$

$$I_i(TECU) = \frac{1}{40.308} \frac{f_{1m_i}^2 f_{2m_i}^2}{f_{1m_i}^2 - f_{2m_i}^2} \times [(L1_i \lambda_{1m_i} - L2_i \lambda_{2m_i}) + K_i + nL_i], \quad (2)$$

где i – порядковый номер навигационного искусст-

венного спутника Земли (НИСЗ) ГЛОНАСС (орбитальная точка), $m_i=1, \dots, 12$ – номер частотного канала i -го НИСЗ, f_{1m_i}, f_{2m_i} – рабочие частоты i -го НИСЗ; $\lambda_{1m_i}, \lambda_{2m_i}$ – длины волн i -го НИСЗ, м; K_i – постоянная неоднозначности фазы (неизвестное начальное значение); nP_i, nL_i – погрешности определения группового и фазового пути.

Рабочие частоты i -го НИСЗ определяются следующим образом:

$$f_{1m_i} = f_{01} + m_i \Delta f_1; \quad (3)$$

$$f_{2m_i} = f_{02} + m_i \Delta f_2, \quad (4)$$

где $f_{01}=1602.0$ МГц, $f_{02}=1246.0$ МГц – основная и вспомогательная частоты нулевого канала (канала управления); $\Delta f_1=0.5625$ МГц, $\Delta f_2=0.4375$ МГц – шаг сетки частот. Сведения о распределении частотных каналов $m_i=1, \dots, 12$ между НИСЗ ГЛОНАСС, расположенными в орбитальных точках с номерами $i=1, \dots, 24$, содержатся в альманахе системы (в навигационных RINEX-файлах).

Второй особенностью является то, что оперативная информация в навигационном сообщении НИСЗ ГЛОНАСС передается не в виде кеплеровых элементов орбиты, как в GPS, а в виде координат, составляющих вектора скорости и проекций лунно-солнечных ускорений в гринвичской прямоугольной системе координат (СК) в опорные моменты времени. Опорными моментами времени являются середины каждого получасового интервала в течение суток. Естественно, что алгоритм размножения эфемерид ГЛОНАСС отличен от алгоритма, используемого для размножения эфемерид GPS. За основу алгоритма берутся уравнения возмущенного движения НИСЗ, в которых кроме центральной силы притяжения Земли учитывается дополнительная сила,

обусловленная полярным сжатием и характеризующая гармоникой C_{20} , а также лунно-солнечные гравитационные возмущения:

$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} &= -\frac{\mu}{r^3}x + \frac{3}{2}C_{20}\frac{\mu a_e^2}{r^5}x\left(1 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + \\ &+ \omega_3^2x + 2\omega_3V_y + \ddot{x}_{лс}, \\ \frac{d^2y}{dt^2} &= -\frac{\mu}{r^3}y + \frac{3}{2}C_{20}\frac{\mu a_e^2}{r^5}y\left(1 - \frac{5z^2}{r^2}\right) \times \\ &+ \omega_3^2y - 2\omega_3V_x + \ddot{y}_{лс}, \\ \frac{d^2z}{dt^2} &= -\frac{\mu}{r^3}z + \frac{3}{2}C_{20}\frac{\mu a_e^2}{r^5}z\left(3 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + \ddot{z}_{лс}, \end{aligned} \quad (5)$$

где \tilde{d}/dt – локальная производная, взятая в неинерциальной СК (в данном случае – в гринвичской прямоугольной СК); C_{20} – коэффициент при второй зональной гармонике разложения геопотенциала в ряд по сферическим функциям ($-1082.63 \cdot 10^{-6}$); a_e – экваториальный радиус Земли (6378.136 км), ω_3 – угловая скорость вращения Земли ($0.7392115 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$); μ – константа гравитационного поля Земли ($398600.44 \text{ км}^3/\text{с}^2$); $\ddot{x}_{лс}$, $\ddot{y}_{лс}$, $\ddot{z}_{лс}$ – лунно-солнечные гравитационные ускорения, в $\text{м}/\text{с}^2$. Все значения берутся из [http://www.glonassgsm.ru/upl_instructions/-3.3.4_Rus.pdf].

При интегрировании уравнений (5) лунно-солнечные гравитационные ускорения $\{\ddot{x}_{лс}, \ddot{y}_{лс}, \ddot{z}_{лс}\}$ полагаются постоянными величинами на интервалах ± 15 мин.

Процедура размножения эфемерид проводится численным интегрированием уравнений (5). Начальными условиями для интегрирования являются координаты, составляющие вектора скорости и проекции лунно-солнечных ускорений, содержащиеся в навигационном RINEX-файле. Интегрирование проводится одношаговым методом Рунге–Кутты четвертого порядка, когда при разложении нелинейной функции в ряд удерживаются все члены до Δt^4 ; Δt – шаг интегрирования. Для этого метода локальная ошибка имеет порядок Δt^5 .

Алгоритм размножения эфемерид следующий:

1. Задается система дифференциальных уравнений (6):

$$\begin{cases} d^2x/dt^2 = f_x(x, z), \\ d^2y/dt^2 = f_y(y, z), \\ d^2z/dt^2 = f_z(z); \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} k_{xi} &= f_x(x_{i-1}, z_{i-1})\Delta t, \\ k_{yi} &= f_y(y_{i-1}, z_{i-1})\Delta t, \\ k_{zi} &= f_z(z_{i-1})\Delta t; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} x_i &= x_0 + x'_0\Delta t / 2 + k_{xi}\Delta t / 8, \\ y_i &= y_0 + y'_0\Delta t / 2 + k_{yi}\Delta t / 8, \\ z_i &= z_0 + z'_0\Delta t / 2 + k_{zi}\Delta t / 8. \end{aligned} \quad (8)$$

Задаются начальные условия: x_0, y_0, z_0 – координаты, x'_0, y'_0, z'_0 – скорости, Δt – шаг интегрирования, i –

номер промежуточной точки. В качестве начальных условий берутся опорные координаты и составляющие вектора скорости из навигационного RINEX-файла. Шаг интегрирования берется равным интервалу файла наблюдений.

2. Вычисляются коэффициенты k_1 (7) и координаты (x_1, y_1, z_1) первой промежуточной точки (8).

3. Вычисляются коэффициенты k_2 и координаты второй промежуточной точки (7) и (8).

4. Вычисляются коэффициенты k_3 и координаты третьей промежуточной точки (7) и (8).

5. Вычисляются коэффициенты k_4 .

6. Координаты НИСЗ и составляющие вектора скорости на момент Δt в гринвичской прямоугольной СК определяются по формулам (9) и (10):

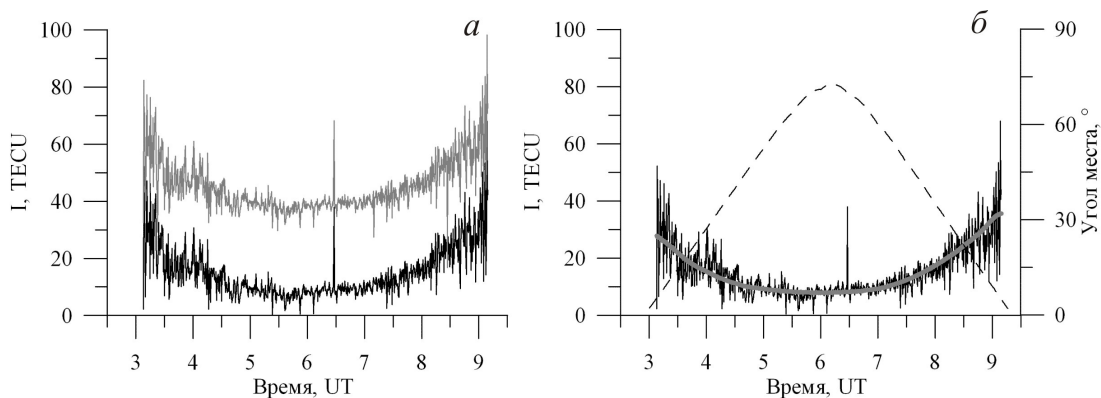
$$\begin{aligned} x_p &= x + x'\Delta t + \frac{1}{6}(k_{x1} + k_{x2} + k_{x3})\Delta t, \\ y_p &= y + y'\Delta t + \frac{1}{6}(k_{y1} + k_{y2} + k_{y3})\Delta t, \\ z_p &= z + z'\Delta t + \frac{1}{6}(k_{z1} + k_{z2} + k_{z3})\Delta t. \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} x'_p &= x' + \frac{1}{6}(k_{x1} + 2k_{x2} + 2k_{x3} + k_{x4})\Delta t, \\ y'_p &= y' + \frac{1}{6}(k_{y1} + 2k_{y2} + 2k_{y3} + k_{y4})\Delta t, \\ z'_p &= z' + \frac{1}{6}(k_{z1} + 2k_{z2} + 2k_{z3} + k_{z4})\Delta t. \end{aligned} \quad (10)$$

Полученные координаты и составляющие вектора скорости являются начальными условиями для определения следующей точки. Интегрирование происходит на интервале ± 15 мин от опорного времени. Простота выбранного алгоритма заключается в том, что из-за особенностей системы дифференциальных уравнений коэффициенты $k_2=k_3$. Кроме того, использование локальных производных в выражении (5) избавляет от необходимости преобразования из инерциальной в гринвичскую СК и определения звездного времени.

Существенной особенностью при обработке данных ГЛОНАСС является также учет межчастотных кодовых задержек (DCB, differential code biases) в трактах НИСЗ и приемной аппаратуры. Необходимость учета межчастотных кодовых задержек обусловлена тем, что при вычислении ПЭС по кодовым задержкам (верхняя формула в выражении (1)) появляются отрицательные значения, что противоречит физическому смыслу данных величин. Это может привести также к ошибкам вычисления абсолютных значений ПЭС в некоторых алгоритмах, поскольку для разрешения неоднозначности фазовых измерений в них используется коррекция фазовых измерений по кодовым задержкам.

Оценками значений межчастотных кодовых задержек занимаются группы, составляющие карты ПЭС в формате IONEX (JPLG, CODG, CODE). Данные задержек P1–P2 или P1–C1 (для одночастотных данных) содержатся либо в IONEX-файлах, либо в специализированных архивах, например [ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/]. Значения задержек даются в наносекундах для каждого спутника СРНС



ПЭС, восстановленное по данным спутника ГЛОНАСС № 15 и станции IRKJ за 22/06/2009 г.: ПЭС по данным групповых измерений с учетом (черная кривая) и без учета (серая кривая) межчастотных кодовых задержек (а); ПЭС, рассчитанное на основе фазовых (серая кривая) и групповых (черная сплошная кривая) измерений, и угол места (штриховая линия) (б).

GPS и ГЛОНАСС и для некоторых приемников сети IGS (~200 на 2010 г.). Значения задержек для каналов различных систем в общем случае различны. Алгоритм учета межчастотных кодовых задержек следующий:

1. Для данного НИСЗ и данной станции за текущие сутки определяются значения межчастотных кодовых задержек $\Delta t_{нс}$ и $\Delta t_{прм}$.
2. Производится коррекция значений кодовых задержек $P1$ и $P2$ в RINEX-файлах:

$$(P1 - P2)_{корр} = (P1 - P2)_{изм} + c\Delta t_{нс} + c\Delta t_{прм}, \quad (11)$$

где c – скорость света.

На рисунке (панель а) представлены данные определения ПЭС по групповому запаздыванию с учетом (черная кривая) и без учета DCB за 22.06.2009 г. для спутника ГЛОНАСС № 15 ($DCB_{P1-P2} = -4.742 \pm 0.012$ нс) и Иркутской станции IRKJ ($DCB_{P1-P2} = -6.422 \pm 0.117$ нс). Можно видеть большое систематическое расхождение между кривыми. На панели б приведена динамика ПЭС, полученного по данным группового (черная сплошная кривая) и фазового запаздывания (серая кривая). Штриховой кривой приведен угол места. Шум фазовых измерений на порядок ниже, что особенно важ-

но при низких углах места.

Заключение

Все вышеперечисленные особенности обработки данных СРНС ГЛОНАСС необходимо учитывать при создании программного обеспечения для восстановления ПЭС на основе данных измерений, содержащихся в RINEX-файлах.

Авторы благодарны С.В. Воейкову за ценные советы. Работа поддержана грантом РФФИ № 10-05-00113, грантом Президента РФ МК-2194.2011.05, а также Министерством образования и науки Российской Федерации (ГК 14.740.11.0078 и 16.518.11.7097).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ГЛОНАСС: принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. 3-е изд., перераб. М.: Радиотехника, 2005. 688 с.

Геодезические константы и параметры общеземного эллипсоида ПЗ-90.02 (доступно с интернет-ресурса http://www.glonassgsm.ru/upl_instructions/-3.3.4_Rus.pdf).

<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/>.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск