

## ПОГРЕШНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ GPS В УСЛОВИЯХ ВОЗМУЩЕНИЙ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

П.В. Татаринов

### GPS ORBITAL USERS POSITIONING ERRORS IN DISTURBED CONDITIONS OF NEAR-EARTH SPACE ENVIRONMENT

P.V. Tatarinov

Представлена методика оценки погрешностей позиционирования орбитальных потребителей СРНС по данным GPS-приемника, установленного на борту низкоорбитального ИСЗ Champ. Приводятся статистические распределения относительных частот погрешностей позиционирования в различных геофизических условиях.

A technique for examination of orbital GPS users' positioning errors on a basis data of GPS-receiver which is set aboard the low earth orbiter Champ is discussed. Statistical distributions of positioning errors in different geophysical conditions are given.

Развитие космических систем и технологий расширяет круг исследовательских и прикладных задач, решаемых такими системами. При этом требования к навигационному обеспечению орбитальных объектов, входящих в состав различных космических систем, постоянно возрастают.

Применение спутниковых радионавигационных систем (СРНС) для решения задач навигации орбитальных объектов позволяет значительно повысить эффективность определения координат и параметров движения таких объектов.

Однако качество функционирования СРНС в значительной мере зависит от состояния околоземного космического пространства (ОКП). Степень проявления этой зависимости определяется величиной полного электронного содержания (ПЭС) вдоль траектории распространения радиосигнала [1]. В работе [2] показано, что во время геомагнитных возмущений в ОКП происходит ухудшение качества функционирования СРНС и, как следствие, снижение точности позиционирования и появление сбоев в определении координат наземных потребителей навигационной информации. Для орбитальных потребителей такие исследования только начинают проводиться.

В некоторых работах [3] указывается, что во время геомагнитных возмущений в ОКП происходит усиление амплитудных и фазовых флуктуаций сигналов навигационных спутников. Это может стать причиной появления дополнительных искажений сигналов и ошибок измерения основных информационных параметров спутниковых навигационных систем.

В последнее время появились работы по исследованию флуктуаций амплитуды и фазы дециметровых радиоволн на трассах спутник-спутник [4], однако с точки зрения орбитального потребителя СРНС значительно больший интерес представляют исследования качества функционирования СРНС как системы определения местоположения.

Целью исследования является оценка точности координат орбитальных потребителей СРНС GPS при различных уровнях возмущенности ОКП.

Автором разработана методика оценки погрешностей позиционирования орбитальных потребителей СРНС. Суть методики заключается в сравнении координат, восстановленных из измеренных орби-

тальным GPS-приемником значений псевдодалностей до навигационных спутников GPS, с координатами данного объекта, полученными с помощью лазерных станций слежения. В качестве орбитального объекта для эксперимента был выбран низкоорбитальный спутник Champ [5]. Параметры орбиты спутника: наклонение  $i = 87.3^\circ$ , высота  $h \sim 400$  км, период обращения  $T \sim 93.55$  мин.

В качестве исходных данных были использованы файлы в формате RINEX [6] для спутника Champ, доступные в сети Интернет [7], навигационные RINEX-файлы для спутников GPS [8], а также высокоточные координаты, предоставляемые Центром геофизических исследований (Потсдам, Германия) [9].

На первом этапе проведения исследований осуществлялось восстановление координат спутника Champ на основе измеренных значений псевдодалностей, содержащихся в RINEX-файлах, с помощью программного продукта TEQC, представленного разработчиками в Интернет [10] и модернизированного для удобства проведения эксперимента.

На втором этапе исследований производилось вычисление абсолютных погрешностей позиционирования по соответствующим координатам с интервалом между отсчетами, равным 30 с:

$$\Delta X_i = X_i - X_{i0}; \quad \Delta Y_i = Y_i - Y_{i0}; \quad \Delta Z_i = Z_i - Z_{i0}, \quad (1)$$

где  $X_i, Y_i, Z_i$  – координаты спутника, восстановленные с помощью программы TEQC;  $X_{i0}, Y_{i0}, Z_{i0}$  – текущие высокоточные прямоугольные геоцентрические координаты спутника;  $i$  – номер текущего отсчета. Далее вычислялась текущая пространственная абсолютная погрешность определения координат спутника  $\Delta(t_i)$ :

$$\Delta(t_i) = \sqrt{\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2 + \Delta Z_i^2}. \quad (2)$$

При исследовании погрешностей позиционирования орбитального потребителя был введен порог неприемлемой погрешности  $\Pi = 300$  м. Значение порога было установлено эмпирически на основании требований, приведенных в [11], и исходя из того, что при решении большинства практических задач требуется более высокая точность определения координат и параметров движения орбитальных потребителей. Таким образом, измерения текущей пространственной абсолютной погрешности определения координат спутника, не удовлетворяющие условию

$$\Delta(t_i) \leq \Pi = 300 \quad (3)$$

определялись как сбой и при исследовании погрешности позиционирования спутника не учитывались.

На рис. 1 и 2 представлены результаты вычисления погрешностей позиционирования низкоорбитального ИСЗ Champ при различных состояниях ОКП. В качестве магнитоспокойного дня было выбрано 11 октября 2003 г. (минимальное значение индекса геомагнитной возмущенности  $D_{st} = -28$  нТл, значение планетарного индекса геомагнитной активности  $K_p$  не превышало 2), а в качестве магнитовозмущенного – сильная магнитная буря 29 октября 2003 г. с минимальным значением  $D_{st}$  до  $-300$  нТл и максимальным значением  $K_p$ , достигающим значения 9.

По результатам исследований была проведена статистическая оценка точности позиционирования спутника Champ в различных геофизических условиях за 356 сут с 1 января по 31 декабря 2003 г.

На рис. 3 в виде гистограмм представлено статистическое распределение абсолютной погрешности позиционирования спутника Champ  $\Delta(t)$  в диапазоне 0–120 м для магнитоспокойного дня (11.10.2003 г. – черная линия) и для магнитовозмущенного дня (29.10.2003 г. – серая линия со штриховкой) соответственно.

Из рис. 3 можно сделать вывод, что и в магнитоспокойных и в магнитовозмущенных условиях

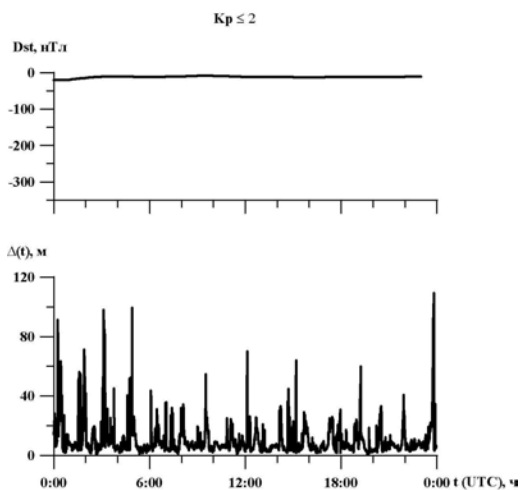


Рис. 1. Погрешности определения координат ИСЗ Champ в магнитоспокойных условиях 11 октября 2003 г.

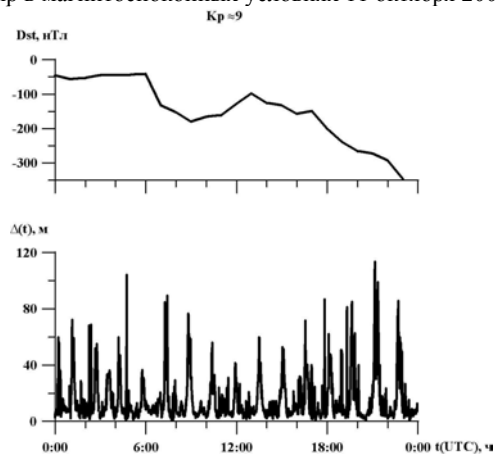


Рис. 2. Погрешности определения координат ИСЗ Champ во время большой магнитной бури 29 октября 2003 г.

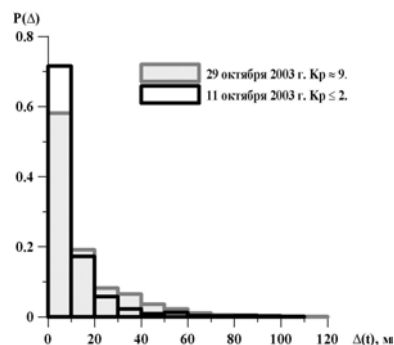


Рис. 3. Статистическое распределение абсолютной погрешности позиционирования спутника Champ при различных состояниях ОКП.

наиболее вероятная ошибка определения местоположения спутника Champ находится в пределах 0–10 м. Следовательно, применение СРНС для решения задач навигации орбитальных объектов удовлетворяет требованиям, предъявляемым к навигационному обеспечению объектов данного класса [11]. Однако в магнитовозмущенных условиях вероятность появления значительной ошибки, превышающей 30 м, примерно в полтора раза выше.

Как упоминалось выше, зависимость погрешностей позиционирования потребителей СРНС определяется вариациями ПЭС вдоль траектории распространения радиосигнала. Для проверки этого утверждения в отношении орбитальных потребителей было проведено сравнение временных зависимостей абсолютной погрешности позиционирования спутника Champ и значений ПЭС, измеряемых в единицах TECU ( $1 \text{TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$ ), восстановленных из данных, измеренных приемником спутника для различных состояний ОКП.

На рис. 4 и 5 представлено сравнение данных для спокойных и возмущенных условий. На нижних графиках показаны функции корреляции  $R(\tau)$  между ПЭС

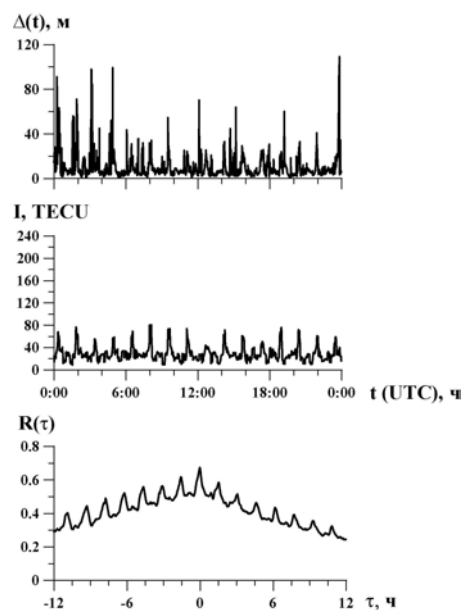


Рис. 4. Сравнение абсолютной погрешности позиционирования спутника Champ и значений ПЭС в магнитоспокойных условиях 11 октября 2003 г.

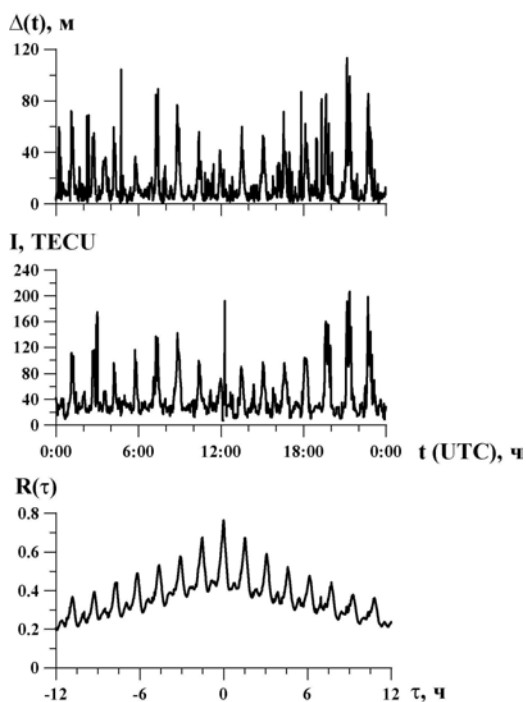


Рис. 5. Сравнение абсолютной погрешности позиционирования спутника Champ и значений ПЭС во время магнитной бури 29 октября 2003 г.

и погрешностями позиционирования. Как видно, коэффициент корреляции при нулевом сдвиге временных рядов ( $\tau = 0$ ) достигает значений  $\sim 0.7-0.8$ , что дает возможность сделать вывод о влиянии изменений ПЭС на погрешности позиционирования орбитальных потребителей. Наличие пиков в функции корреляции при сдвиге временных рядов на время, равное периоду обращения спутника, говорит о том, что спутник периодически попадает в области пространства с похожими условиями распространения сигналов.

Эта работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 03-05-64627, 03-05-64100). Авторы благодарят Центр геофизических исследований (Потсдам, Германия) и лично профессора Рейгбера за данные спутника Champ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондакова Т.Н. // Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. Красноярский государственный технический университет. Красноярск, 2004, 24 с.
2. Afrainovich E.L., Demyanov V.V., Kondakova T.N. Degradation of performance of the navigation GPS system in geomagnetically disturbed conditions // GPS Solutions. 2003. V. 7, N 2. P. 109–119.
3. Ledvina B.M., Makela J.J., Kintner P.M. First observations of intense GPS L1 amplitude scintillations at midlatitude // Geophys. Res. Let. 2002. V. 29. N 14.
4. Викерт Й., Яковлев О.И., Павельев А.Г. и др. Ионосферные флуктуации дециметровых радиоволн на трассах спутник–спутник // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49, № 10. С. 1184–1191.
5. <http://op.gfz-potsdam.de/champ/>
6. Gurtner W. RINEX: The Receiver Independent Exchange Format. Version 2, 1993.
7. <http://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/rinex2.txt>.
8. <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/leodata/champ/>
9. <ftp://lox.ucsd.edu/pub/nav>
10. <http://isdg.gfz-potsdam.de/champ/>
11. <http://www.unavco.org/facility/software/teqc/teqc.html>
12. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / Под ред. В.Н. Харисова, А.И. Перова, В.А. Болдина. М.: ИПРЖР, 1998. 400 с.

Иркутское высшее военное авиационное инженерное училище,  
Иркутск