

Ю.А. Комаровский\*

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕРЦАНИЯ ИОНОСФЕРЫ НА СЛУЧАЙНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ КООРДИНАТ GPS-ПРИЁМНИКА GP-37

Случайные погрешности обсервованных координат приёмника спутниковой радионавигационной системы (СРНС) Навстар GPS возникают по целому ряду причин. Одна из них кроется в стохастическом характере флуктуаций полного электронного содержания (ТЕС – Total Electron Content) в трансionoсферном канале распространения радиоволн от спутника. Нерегулярности ТЕС вызываются сложными процессами в структурах ионосферы и зависят от географического места расположения GPS-приёмника, сезона, состояния магнитосферы, солнечной активности и уровня космического излучения. Суточная вариация ТЕС определяется главным образом зенитным углом Солнца. В монографии [1] утверждается, что ионообразование возрастает быстро около восхода Солнца и остаётся почти постоянным до захода. При спокойной ионосфере наблюдается регулярное изменение ТЕС. Амплитуды и фазы суточных вариаций ТЕС зависят от географического места наблюдений, времени суток и от времени года.

В основе работы СРНС Навстар GPS лежит дальномерный способ определения координат приёмника потребителя. Вариации ТЕС вызывают погрешности в измеряемых дальностях до спутников. На рис. 1 показаны суточные изменения погрешностей таких дальностей. Рис. 1 позаимствован из статьи [2], в которой описаны результаты наблюдений в Рио-де-Жанейро.

Так как поясное время в Рио-де-Жанейро на 3 часа меньше UTC, то из рисунка следует, что минимальные погрешности в изме-

ряемых до спутников расстояниях имели место в 5 часов утра. Затем погрешность монотонно росла до 16 часов.

Приведённый пример указывает на то, что погрешность измеряемых GPS-приёмниками расстояний до спутников не определяется полностью только процессами ионообразования в ионосфере, но имеет ярко выраженный суточный характер.

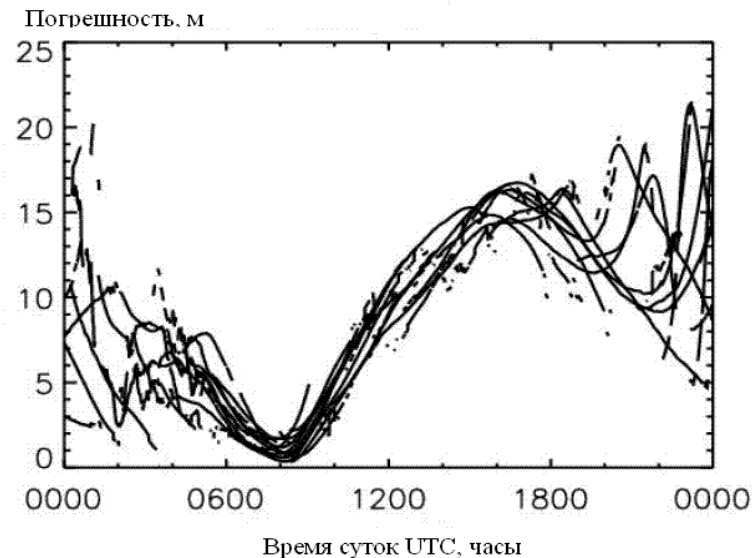


Рис. 1. Погрешности измерения дальностей до спутников [2]

Регулярную составляющую погрешностей расстояний принято устранять с помощью так называемой ионосферной поправки. Впервые модель ионосферной погрешности для GPS-приёмников была разработана американским учёным Клобухаром (John A. Klobuchar) [3]. Им же был предложен простой алгоритм устранения регулярной составляющей ионосферной погрешности [4]. Алгоритм Клобухара официально принят в СРНС Навстар GPS для режима SPS, предназначенного для гражданских одночастотных ( $f_1 = 1575,42$  МГц) приёмников [5, 6, 9]. Алгоритм Клобухара оперирует временем задержки сигнала спутника, которое рассчитывается по оценке полного электронного содержания в направлении на зенит.

\* Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского. Владивосток, komarovskiy@msun.ru

Параметры модели Клобухара непрерывно транслируются всеми спутниками СРНС Навстар GPS. С помощью такой технологии устраняется до 80 % ионосферных погрешностей в одночастотных гражданских GPS-приёмниках в магнитоспокойные периоды времени [7]. Для двухчастотных GPS-приёмников, в которых применяются фазовые измерения расстояний до спутников, разработаны другие модели ионосферы и алгоритмы устранения ионосферных задержек [8].

На долю нерегулярных погрешностей измеряемых расстояний в одночастотных приёмниках приходится более 20%. Такие погрешности происходят из-за высокочастотных флуктуаций ТЕС и мелкомасштабных ионосферных неоднородностей. Эти явления приводят к мерцанию амплитуды радиосигналов, поступающих от спутников системы GPS. На процессы мерцания, потенциально снижающие точность определения координат создаваемой в США СРНС Навстар GPS, обратили внимание ещё в начале 70-х годов J. Klobuchar [3] и J. Aarons [10]. С тех пор мерцание ионосферы стало важным объектом исследований, направленных на повышение точности и надёжности работы приёмников СРНС Навстар GPS. В последние годы были изучены сопутствующие физические процессы, определяющие динамику магнитоактивной плазмы ионосферы. Среди них важное место занимают диффузия флуктуаций электронной концентрации, возникновение естественных неоднородностей ионосферы и их перемещения в зависимости от времени суток и сезона, региона, а также от геомагнитной и солнечной активности [11-15]. Результаты исследований последних лет показали, что высокая интенсивность мерцания ионосферы чаще проявляется в высоких широтах и в экваториальном поясе [2, 9, 15]. В средних широтах в северном полушарии мерцания чаще проявляются в летние месяцы года в ночное время суток [2, 16].

На работу приёмника СРНС Навстар GPS мерцание ионосферы сказывается по-разному в зависимости от способа измерения псевдодальности. Приёмники, в которых реализован фазовый способ измерения, во время мерцаний могут измерять псевдодальности с погрешностями до нескольких десятков метров [2]. Кроме того, у них наблюдаются срывы в сопровождении измеряемой фазы и, сле-

довательно, паузы в работе. В течение таких пауз, которые могут длиться от нескольких секунд до 1 часа, полностью или частично теряется возможность определения координат потребителя [17].

Двухчастотные приёмники с фазовым измерением псевдодальности позволяют с более высокой точностью определять координаты по сравнению с одночастотными. Но одночастотные приёмники более устойчивы к срывам сопровождения фазы в условиях мерцания ионосферы [2, 18]. Приёмники с фазовым способом измерения используются главным образом для геодезических работ. Исследование влияния мерцания ионосферы на работу одночастотного приёмника с кодовым способом измерения псевдодальности до сих пор не проводилось. Высказывались только предположения об устойчивости таких приёмников к мерцаниям.

Одночастотные GPS-приёмники с кодовым измерением радионавигационного параметра используются на подвижных транспортных средствах. К таким средствам в первую очередь относятся морские суда. Для них паузы в сопровождении сигналов спутников СРНС Навстар GPS или возникновение больших погрешностей в обсервованных координатах чреваты авариями с тяжёлыми последствиями. Поэтому давно назрела необходимость в проведении исследований, направленных на оценку влияния мерцания ионосферы на надёжность и точность работы судовых приёмников.

Для исследований был взят массив данных, накопленных в ходе экспериментальных наблюдений за работой судового GPS-приёмника GP-37, изготовленный компанией Furuno. Наблюдения проводились с 25 сентября по 17 октября 2006 года на базе Артёмовской топографо-геодезической экспедиции вблизи пункта фундаментальной астрономо-геодезической сети “Владивосток”. Данный пункт летом 2006 года прошёл государственную сертификацию, а его геодезические координаты в системе WGS-84 тогда же были определены с точностью до десятых долей миллиметра. Информация от приёмника GP-37 ежесекундно автоматически записывалась на жёсткий диск ноутбука в стандарте NMEA 0183. В ходе предварительной обработки полученного материала был сформирован массив из 1847558 строк, каждая из которых содержала дату, время по шкале UTC, широту и долготу антенны в системе геодезических координат WGS-84.

Предполагалось, что мерцание ионосферы будет вызывать рассеивание обсервованных координат. Так как мерцания чаще регистрируются в ночное время, то ожидалось большее рассеивание координат в это время суток. В качестве меры рассеивания были выбраны средние квадратические погрешности (СКП) зарегистрированных широт  $\sigma_\varphi$  и долгот  $\sigma_\lambda$ , рассчитанные для интервалов осреднения 1, 5 и 10 минут по каждому часу суток. С этой целью исходный массив данных сглаживался с помощью простого скользящего среднего без взвешивания. Затем по каждому часу суток вычислялись средние значения разностей  $\varphi_{CPj}$   $\lambda_{CPj}$ ,

$$\varphi_{CPj} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\varphi_{ji} - \varphi_{ji}^{(CF)}), \quad \lambda_{CPj} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\lambda_{ji} - \lambda_{ji}^{(CF)}),$$

где  $j$  – номер часа суток,  $j = 1, 2, \dots, 24$ ;  $i$  – номер значения широты и долготы в  $j$ -том часу суток;  $\varphi_{ji}^{(CF)}$ ,  $\lambda_{ji}^{(CF)}$  – сглаженные значения

широт и долгот соответственно;  $\varphi_{ji}$ ,  $\lambda_{ji}$  – значения обсервованных широт и долгот соответственно, совпадающие по времени со сглаженными значениями;  $N$  – число сглаженных значений координат в  $j$ -том часу суток.

СКП широт и долгот в метрах для каждого часа суток вычислялись по следующим формулам:

$$\sigma_{\varphi_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\varphi_{ji} - \varphi_{ji}^{(CF)}) - \varphi_{CPj}}{N}} \times l_m, \quad \sigma_{\lambda_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\lambda_{ji} - \lambda_{ji}^{(CF)}) - \lambda_{CPj}}{N}} \times l_p,$$

$$l_m = \frac{a(1 - e^2) \times \arcl' }{\sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^3}}, \quad l_p = \frac{a \times \arcl' \times \cos \varphi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}},$$

где  $\varphi$  – широта места установки антенны приёмника GP-37 во время экспериментальных наблюдений,  $a$  – большая полуось референц-эллипсоида WGS-84,  $e$  – первый эксцентриситет референц-эллипсоида WGS-84.

Графики вычисленных суточных изменений СКП широт и долгот для интервалов сглаживания 1 мин, 5 мин и 10 мин представлены на рис. 2–4.

Сравнение графиков рис. 2–4 позволяет сделать заключение о том, что, во-первых, увеличение интервала сглаживания вызывает заметное изменение характера суточного хода случайных погрешностей координат, во-вторых, приводит к увеличению постоянной составляющей их СКП. Как следует из работы [9], в которой приведены результаты наблюдений за мерцанием сигналов спутников на контрольно-измерительной станции СРНС Навстар GPS острова Кваджелейна, период мерцаний на частоте  $f_1$  приблизительно равен 1,5 с. Поэтому использование интервала сглаживания, равного 1 минуте, позволяет обнаружить эффект мерцания. При увеличении ин-



Рис. 2. Суточные изменения случайных погрешностей широты и долготы для окна сглаживания 1 мин

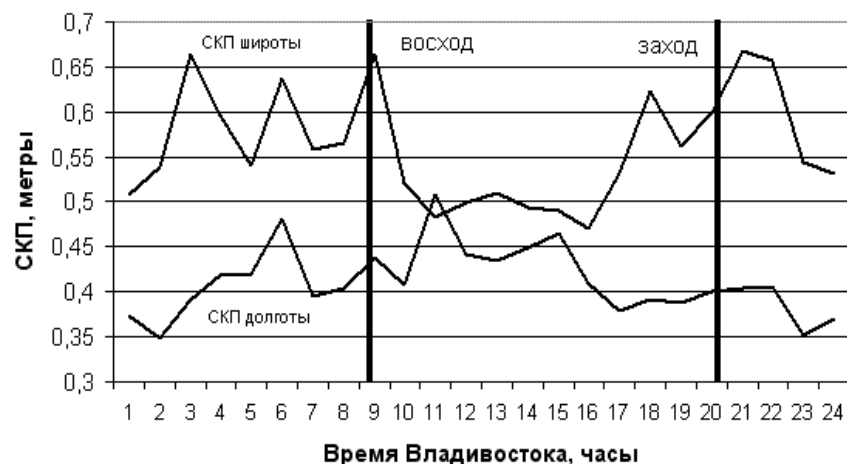


Рис. 3. Суточные изменения случайных погрешностей широты и долготы для окна сглаживания 5 мин

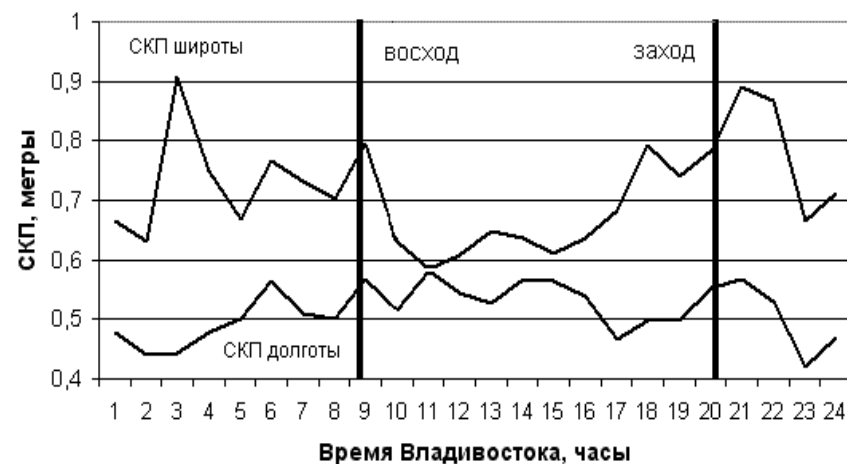


Рис. 4. Суточные изменения случайных погрешностей широты и долготы для окна сглаживания 10 мин

интервала сглаживания начинает проявляться влияние перемещений спутников. Кроме того, начинает сказываться присутствие тренда в суточном ходе систематических погрешностей широты и долготы [19].

На графиках рис. 2–4 видно, что СКП долготы не имеет характерного провала в дневное время суток, как это обнаруживается в суточном ходе СКП широты. Такое явление связано с квазипериодическими изменениями электронной концентрации вдоль широты, что вызвано распространением среднemasштабных перемещений ионосферных возмущений с периодами 15-20 минут и внутренними гравитационными волнами. Сильнее волновые возмущения проявляются в дневное время суток [12]. В работе [12] также указывается на присутствие наклона фазового фронта ионосферных неоднородностей и их перемещений с севера на юг.

Если рассматривать суточный ход СКП широты и долготы на рис. 2, то надо отметить заметное уменьшение уровня случайных погрешностей обсервованных координат в дневное время по сравнению с ночным. Этот факт полностью согласуется с результатами исследований мерцаний ионосферы в Дальневосточном среднеширотном регионе [16].

Максимум СКП долготы на рис. 2 отстаёт от максимума СКП широты на два часа. Объяснить этот факт можно присутствием в ионосфере обширных структур, вызывающих мерцание сигналов спутников СРНС Навстар GPS. Такие структуры в зависимости от времени суток изменяются в размерах, а также перемещаются. Увеличение СКП широты происходит из-за смещения такой структуры к плоскости меридиана, проходящего через место наблюдения. Наступление пика СКП долготы возникает вследствие смещения структуры к плоскости первого вертикала наблюдателя.

Как следует из графиков рис. 2–4, случайные погрешности широты превосходят СКП долготы. Объяснением тому служит существование на небосводе зоны, в которой всегда отсутствуют спутники СРНС Навстар GPS [20]. Так как такая зона в средних широтах в нашем полушарии располагается к северу, то погрешности измерения псевдодальностей до спутников приводят к большим погрешностям в обсервованной широте, нежели в обсервованной долготе.

В заключении следует сделать следующие выводы.

1. Мерцание ионосферы оказывает влияние на уровень случайных погрешностей обсервованных координат судового приёмника GP-37. Наиболее подвержена влиянию мерцания обсервованная широта.

2. Максимальные значения СКП широты и долготы, вызываемые мерцанием ионосферы, равны 0,233 м и 0,136 м соответственно. СКП обсервованных широт и долгот, полученных в ходе наблюдений, составили 1,354 м и 0,983 м соответственно. Следовательно, на долю мерцания ионосферы приходится 17,2 % и 13,8 % от общих случайных погрешностей обсервованных широт и долгот.

3. Экспериментальные наблюдения, результаты которых использованы в данном исследовании, были получены осенью. В летние месяцы следует ожидать большего влияния мерцания ионосферы на случайные погрешности обсервованных координат судовых GPS-приёмников.

4. В исследованиях влияния мерцания ионосферы предложенным в данной работе способом не следует выбирать интервал сглаживания более 1 минуты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дэвис, К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. – 502 с.
2. Datta-Barua S., Doherty P.H., Delay S.H., Dehel t., Klobuchar J.A. Ionospheric scintillation effects on single and dual frequency GPS positioning. // Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Technical Meeting on the Satellite Division of the Institute of Navigation ION/GNSS 2003, Portland (USA), September 9-12, 2003, pp. 336 – 346.
3. Klobuchar, J. A. A First-Order, Worldwide, Ionosphere Time Delay Algorithm. Air Force Surveys in Geophysics, No. 324, 25 September 1975, pp. 3 – 24.
4. Klobuchar, J. A. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users. // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-23, No. 3, 1987, pp. 325 – 331.
5. Interface Control Document (ICD-GPS-200). Rev. C (IRN-2000-004), 12 April 2000, 138 p.
6. Global Positioning System Standard Positioning Service (SPS) Signal Specification. 2<sup>nd</sup> Edition. 2 June, 1995, 45 p.
7. Яценков, В. С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. – М. : Горячая линия–Телеком, 2005. – 272 с.

8. Антонович, К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 1. ГОУ ВПО “Сибирская государственная геодезическая академия”. – М. : ФГУП “Картгеоцентр”, 2005. – 334 с.

9. Klobuchar, J. A. Ionospheric Effect on GPS. Global Positioning System: Theory and Applications. Edited by Bradford W. Parkinson, James J. Spilker. Vol. I. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, DC, 20024-2518, 1996, pp. 485 – 515.

10. Jules Aarons. Global Morphology of Ionospheric Scintillations. // Proceedings of the IEEE. Vol. 70, No. 4. April 1982, pp. 360 – 378.

11. Мясников, Е.Н. Квазистатическая турбулентность плазмы верхней ионосферы при искусственных и естественных возмущениях : автореф. дисс. : д-ра физ.-матем. наук / Е.Н. Мясников; Научно-исследовательский радиопизический институт. – Нижний Новгород, 2007. – 37 с.

12. Шаимуратов И. И., Карпов И. В., Кушевецкий С. П., Ружин Ю. Я. Исследование структуры перемещающихся ионосферных возмущений на основе томографических экспериментов. // Геомагнетизм и аэрномия. – 2001. Т. 41, № 3. – С. 394 – 399.

13. Mark F. Knight, Antony Finn, Manuel Cervera. Ionospheric Effects on Global Positioning System Receivers. DSTO Electronics and Surveillance Research Laboratory. Department of Defense of Australia, February 1998, 99 p.

14. Robert A. Steenburgh. Holes: Ionospheric Scintillation GPS and Imputation. Department of the Air Force. Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio. March 2007, 101 p.

15. Kintner P. M., Ledvina B. M. The ionosphere, radio navigation, and global navigation satellite systems. // Advances in Space Research, 2005, No. 35, pp. 788 – 811.

16. Hajkowicz L. A., Minakoshi H. Mid-latitude ionospheric scintillation anomaly in the Far East // Annales Geophysicae, 2003, No. 21, pp. 577 – 581.

17. Matsunaga K., Hoshino K., Igarashi K. Observations of Ionospheric Scintillation on GPS Signals in Japan // The Journal of Institute of Navigation (USA), 2003, Vol. 50, No. 1, pp. 1 – 7.

18. Афраймович Э. Л., Демьянов В. В., Кондакова Т. Н. Исследования качества функционирования двухчастотных GPS приёмников во время геомагнитных бурь // Электронный журнал “Исследовано в России”. – С. 164 – 173. [Электронный ресурс] <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/016.pdf>

19. Комаровский Ю. А. Исследование модели погрешностей определения места судна приёмником СРНС НАВСТАР GPS // Транспортное дело России. Специальный выпуск № 2, М.: 2004. С. 15 – 19.

20. Комаровский Ю. А. Четыре проблемы использования Навстар GPS. / Сборник докладов науч.-практич. конф. “Безопасность судоходства в Дальневосточном бассейне”. 24-25 окт. 2007 г. / Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2007. С. 207 – 214.