

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ КОСМИЧЕСКИХ И БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

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

*Приведены результаты экспериментальных исследований путей повышения точности измерений бортовой аппаратуры спутниковой навигации космических и баллистических объектов с использованием контрольно-корректирующих станций дифференциального режима.*

В настоящее время основным источником получения координатно-временной информации о космических и баллистических объектах (КБО) на всех этапах их эксплуатационного цикла является наземный измерительный комплекс, который обеспечивает точность восстановления траектории на уровне десятков – сотен метров. Такой уровень погрешностей является удовлетворительным, например, для решения задач прогнозирования и выдачи целеуказаний наземному комплексу управления. Тем не менее, бурное развитие микроэлектронной техники и, прежде всего, бортовых систем наблюдения и локации, а также постоянно расширяющийся круг решаемых функциональных задач КБО выдвигают более жесткие требования к точности и надежности траекторных определений. Так современный уровень развития систем дистанционного зондирования Земной поверхности обеспечивает разрешающую способность получаемых изображений на уровне первых десятков сантиметров. Такие высокие характеристики требуют точности координатной привязки на уровне единиц метров и менее. Кроме того, на начальных этапах эксплуатационного цикла КБО, например, при выводе КА на орбиту действуют только радиолокационные средства, что является явно недостаточным с точки зрения точности и надежности решения задачи. Как показал **анализ последних исследований и публикаций**, обеспечить требуемую точность позволяют современные разработки в области спутниковых навигационных технологий [1 – 3]. Навигационные GPS приемники обеспечивают точность определения координат порядка 10 ... 15 м в автономном режиме и единиц метров и менее при применении дифференциального режима определений [4]. Следует отметить, что

это утверждение справедливо для определений в приземном слое. Однако, с точки зрения потенциальных возможностей применение дифференциального режима является весьма перспективным и для определений бортовой аппаратуры КБО. При этом должно обязательно быть учтено различие в условиях нахождения аппаратуры КБО и аппаратуры контрольно-корректирующей станции (ККС) дифференциального режима, которая располагается на земной поверхности. Так в измерениях аппаратуры спутниковой навигации (АСН) КБО, в отличие от измерений ККС, будет отсутствовать влияние тропосферной погрешности, а влияние ионосферной погрешности измерений будет различным.

Таким образом, **постановка задачи** заключается в исследовании возможных путей повышения точности координатных определений АСН КБО за счет применения дифференциального режима измерений. При этом основное внимание должно быть уделено компенсации ионосферной составляющей погрешности измерений аппаратуры спутниковой навигации при использовании двухчастотных измерений наземной ККС. Результатом данных исследований должны быть обоснованные рекомендации на разработку методов коррекции измерений АСН для достижения максимально возможных характеристик точности определения параметров траектории КБО.

**Изложение основного материала.** Все контрольно-корректирующие станции дифференциального режима навигационных определений, как правило, оборудуются двухчастотными приемниками сигналов GPS, что позволяет с высокой точностью восстановить значения ионосферной задержки вдоль трассы распространения сигнала и учесть ее в дальнейшем решении задачи. С другой стороны национальные КБО в настоящее время оборудуются одночастотной АСН, компенсация влияния ионосферы в которой возможно только с применением теоретических моделей ионосферы или при использовании коррекций измерений извне.

На рис. 1 представлены результаты экспериментального сравнения величин ионосферной погрешности измерений для аппаратуры перманентной GPS-станции GLSV (Голосеево, Киев,  $B = 50^\circ$ ,  $L = 30,5^\circ$ ) и АСН, размещенной на борту европейского КА ШАМП с высотой орбиты около 400 км. При выполнении исследования были использованы суточные файлы измерений в формате RINEX, полученные с ftp-серверов сети Интернет [5]. Измерения проведены 7 августа 2000 года для спутников с номерами 1 и 7 на интервале времени 10.51.00 – 10.56.30 по всемирному времени (UTC). Для достижения максимальной адекватности эксперимента все значения были получены на интервале времени, когда КА дви-

гался над территорией Украины, т.е. трассы распространения навигационных сигналов к КА и ККС были максимально близки.

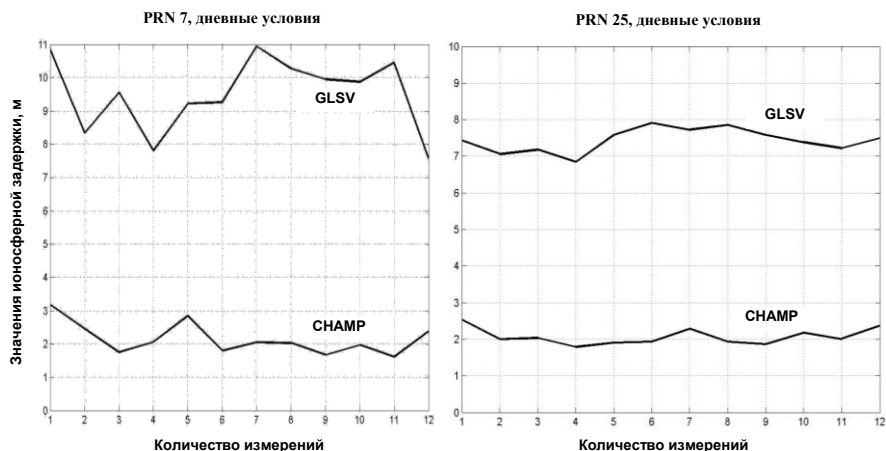


Рис. 1. Результаты экспериментального сравнения

Данные результаты свидетельствуют о существенных различиях в ионосферных задержках ККС и АСН. Для оценки влияния ионосферы на точность определения координат была выполнена оценка точности с использованием выражения для информационной матрицы Фишера:

$$H_p = [A^T W A]^{-1}, \quad (1)$$

где  $H_p$  – корреляционная матрица погрешностей определения координат;  $A$  – матрица частных производных функций измерений по оцениваемым параметрам (в данном случае по координатам АСН);  $W$  – весовая матрица или обратная корреляционная матрица ионосферных погрешностей измерений.

В табл. 1 представлены результаты оценки потенциальной точности определения координат АСН без использования ионосферной коррекции (PDOP имеет смысл геометрического фактора определения пространственных координат, характеризующего степень ухудшения точности определения искомых параметров по отношению к точности измерения первичных параметров, в данном случае – к ионосферным погрешностям,  $\sigma_{R1} \dots \sigma_{R6}$  и  $\sigma_p$  – СКО погрешности измерения псевдодальностей и определения координат).

Результаты табл. 1 свидетельствуют, что точность определения АСН положения в пространстве без выполнения коррекции ионосферной погрешности составляет значения 10 ... 25 м (СКО) в зависимости от количества спутников в созвездии. При решении ряда задач такая точность может быть неудовлетворительной.

Таблица 1

Оценка потенциальной точности определения координат АСН  
без использования ионосферной коррекции

Количество спутников		4	5	5	5	5	5	6
Ионосферная задержка	$\sigma_{R1\text{ион}}, \text{ м}$	2,5	2,4	2	3,00	2	1,80	2,05
	$\sigma_{R2\text{ион}}, \text{ м}$	3,1	2,4	1,7	2,06	2,8	2,88	2,59
	$\sigma_{R3\text{ион}}, \text{ м}$	2,2	2,0	2	1,78	1,8	2	2,29
	$\sigma_{R4\text{ион}}, \text{ м}$	0,8	0,8	2,0	2	1,9	0,84	0,91
	$\sigma_{R5\text{ион}}, \text{ м}$	–	2	0,6	0,59	0,8	1,93	4,65
	$\sigma_{R6\text{ион}}, \text{ м}$	–	–	–	–	–	–	2
PDOP		6,3	5,92	5,90	5,89	5,8	5,87	3,65
$\sigma_p, \text{ м}$		23	14,1	11,0	11,1	15,1	11,8	9,88

В табл. 2 представлены результаты оценки потенциальной точности определения координат АСН при организации прямой дифференциальной поддержки от ККС.

Таблица 2

Оценки потенциальной точности определения координат АСН  
при организации прямой дифференциальной поддержки от ККС

Количество спутников		4	5	5	5	5	5	6
Ионосферная задержка	$\sigma_{R1\text{ион}}, \text{ м}$	4,8	5,6	5,5	5,7	6,2	7,4	6,2
	$\sigma_{R2\text{ион}}, \text{ м}$	7,6	5,8	7,8	5,7	6,3	4,4	4,8
	$\sigma_{R3\text{ион}}, \text{ м}$	6,5	5,0	5,6	5,0	6,7	6,3	5,8
	$\sigma_{R4\text{ион}}, \text{ м}$	4,4	4,6	5,1	5,8	5,6	4,4	4,4
	$\sigma_{R5\text{ион}}, \text{ м}$	0	5,9	4,6	4,6	4,4	5,9	5,3
	$\sigma_{R6\text{ион}}, \text{ м}$	0	0	0	0	0	0	5,2
PDOP		6,3	5,92	5,90	5,89	5,8	5,87	3,65
$\sigma_p, \text{ м}$		189,4	146,5	170	145,1	156,4	162,4	100,9

Значения табл. 2 показывают практическую нецелесообразность использования прямой коррекции измерений АСН со стороны наземной ККС. Такой подход приведет к существенному ухудшению точности определения исходных параметров.

Компромисс применения дифференциального режима для коррекции измерений АСН может быть найден в следующем. Существуют хорошо апробированные на практике теоретические представления о состоянии параметров ионосферы, которые позволяют рассчитывать значения общей электронной концентрации (ТЕС) в любой заданной точке пространства. С учетом разности в высотах положения АСН и ККС особый интерес представляют модели высотного распределения ТЕС, т.е. модели позволяющие рассчитать значение ионосферной погрешности в зависимости от высоты над уровнем моря. С использованием двухчастотных измерений наземной ККС параметры такой модели могут быть адаптированы к текущим регио-

нальным условиям, а сама модель – использована для расчета ионосферной поправки на место и высоту расположения АСН КБО. На рис. 2 представлены предварительные результаты практического применения изложенной методики. В качестве теоретического представления ионосферы использовалась модель Чиу-Чанга [6], характеризующая распределение высотного профиля ТЕС. В процессе адаптации к реальным измерениям ККС оценке подвергались некоторая совокупность параметров данной модели, выбранных в качестве свободных.

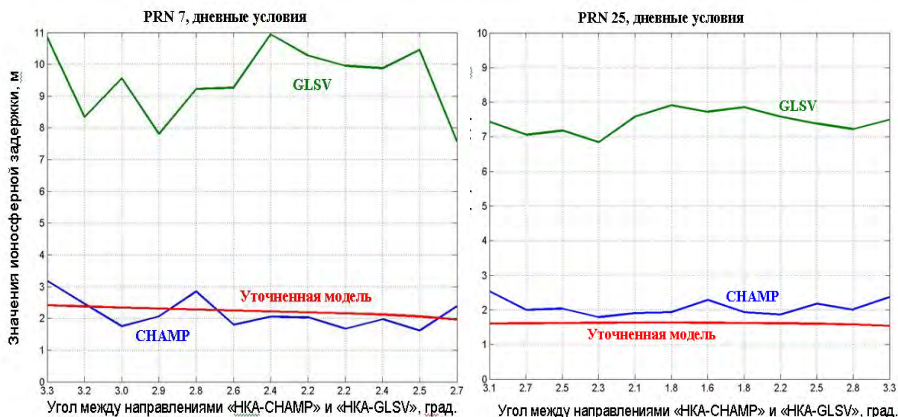


Рис. 2. Результаты практического применения изложенной методики

Графические результаты рис. 2 свидетельствуют об удовлетворительном соответствии реальной ионосферной погрешности АСН CHAMP и ее адаптированного модельного значения, полученного на основе измерений наземной ККС. В табл. 3 представлены результаты оценки потенциальной точности применения изложенной методики при определении координат АСН.

Таблица 3

Оценка потенциальной точности применения изложенной методики при определении координат АСН

Количество спутников		4	5	5	5	5	5	6
Ионосферная задержка	$\sigma_{R1\text{ион}}, \text{ м}$	0,9	0,7	1,2	1,1	0,3	0,4	0,2
	$\sigma_{R2\text{ион}}, \text{ м}$	0,7	0,09	0,5	0,2	0,5	0,9	0,5
	$\sigma_{R3\text{ион}}, \text{ м}$	0,6	0,3	0,4	0,1	0,08	0,2	0,6
	$\sigma_{R4\text{ион}}, \text{ м}$	0,1	0,2	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2
	$\sigma_{R5\text{ион}}, \text{ м}$	0	0,5	0,4	0,5	0,2	0,3	0,2
	$\sigma_{R6\text{ион}}, \text{ м}$	0	0	0	0	0	0	0,1
PDOP		6,3	5,92	5,90	5,89	5,8	5,87	3,65
$\sigma_p, \text{ м}$		1,83	0,56	1,38	1,26	0,53	0,54	0,14

**Выводы.** Результаты выполненных экспериментальных исследований позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Ионосферная погрешность является превалирующей для измерений бортовой АСН КБО.

2. Применение традиционного дифференциального режима с коррекцией измеряемых параметров АСН на основе прямого использования информации наземной ККС приводит к существенному ухудшению точности определений, что обусловлено различием условий выполнения измерений.

3. Наиболее целесообразным путем повышения точности определений требуемых параметров бортовой АСН является применение адаптированных к текущим региональным условиям моделей распределения высотного профиля состояния ионосферы с использованием двухчастотных измерений наземных ККС.

Дальнейшие направления исследований могут быть связаны с определением статистических характеристик применения изложенного подхода для различных типов КБО и различных условий их эксплуатации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Montenbruck O., Gill E., *Ionospheric Correction for GPS Tracking of LEO Satellites* // *The journal of navigation*. – United Kingdom. – 2002. – P. 293 – 304.
2. *Глобальна система визначення місцеположення (GPS): Теорія і практика* / Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз. – К.: Наук. думка, 1995. – 380 с.
3. Neumayer K. H., Zhu S. Yu., et al. *CHAMP Orbit Recovery – Algorithmic Approaches and Preliminary Results* // *GFZ Potsdam Center Annual Report*. – AN-G61A-01. – 2003. – 15 p.
4. Heise S., Jakowski N., Wehrenpfennig A., Reigber R. *Initial Results on Ionosphere / Plasmasphere Sounding Based on GPS Data Obtained on Board CHAMP* // *ESA Space Weather Workshop*. – 17-19 December 2001. – ESTEC, Noordwijk, Netherlands. – 8 p.
5. [Электр. ресурс]. – Режим доступа: <ftp.isdc.gfz-potsdam.de/champ/>.
6. Chiu Y.T. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 1975. – V.37. – P. 1563.

Поступила 31.08.2004

**ДЕДЕНОК Виктор Петрович**, докт. техн. наук, профессор, первый зам. нач. Объединенного научно-исследовательского института ВС. Окончил ВИРТА ПВО в 1975 году. Область научных интересов – адаптивная обработка информации космических систем.

**РЕЗНИКОВ Юрий Вячеславович**, адъюнкт ОНИИ ВС. Окончил ХВУ в 2000 году. Область научных интересов – системы и комплексы спутниковой навигации и геодезии.