

© Чаплинский В.С., Шаститко В.А.  
Chaplinsky V., Shastitko V.

## НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЛЕТА ОКОЛОЗЕМНЫХ КА С КОМПЛЕКСНЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

### NAVIGATING MAINTENANCE OF FLIGHT CIRCUMTERRANEOUS SPACE VEHICLES WITH COMPLEX USE OF MEASURING MEANS

**Аннотация.** Проводится анализ перспективных способов решения задач траекторного контроля околоземных летательных аппаратов космического назначения на основе применения средневысотных навигационных систем типа Глонасс, безапробных измерений скоростных навигационных параметров, космических систем ретрансляции, многопутевых траекторных измерений.

**Annotation.** The analysis of perspective ways of the decision of problems trajectory the control of circumterrestrial flying machines of space appointment on the basis of application an average of high-rise navigating systems of type Glonass, without inquiry measurements of high-speed navigating parameters, space systems of relaying, multitravelling a trajectory of measurements is passed.

**Ключевые слова.** Текущие навигационные параметры, космическая система ретрансляции, космические навигационные системы.

**Key words.** Current navigating parameters, space system of relaying, space navigating systems.

Для навигационного обеспечения полета ракет-носителей (РН), разгонных блоков (РБ) и околоземных космических аппаратов (КА) могут использоваться:

- средства непосредственных измерений текущих навигационных параметров (ИТНП) в зоне радиовидимости РН, РБ и КА с пунктов наземных комплексов управления (НКУ);
- средства ретрансляционных ИТНП РН, РБ и КА-абонентов космической системы ретрансляции (КСР);
- навигационная аппаратура потребителя (НАП) средневысотных космических навигационных систем Глонасс/GPS, размещаемая на борту РН, РБ и КА.

Состав измеряемых ИТНП наземными средствами и топологическая структура НКУ выбираются исходя из требуемой точности определения и прогнозирования параметров движения РБ и КА. Однако из-за пространственно-временных ограничений низкоорбитальные КА даже в случае применения многопунктного комплекса средств прямого информационного обмена

с КА, распределенных по всей территории страны, ежедневно имеют до 5-6 невидимых витков полета. В случае же применения однопунктных комплексов контроля и управления низкоорбитальными КА в течение суток видимость КА вообще имеется на 5-6 витках. Данное обстоятельство приводит к необходимости прогнозировать параметры движения на 12...24 часа, что, в свою очередь, существенно снижает точность навигационного обеспечения полета.

Применение космической системы ретрансляции позволяет существенно повысить оперативность контроля и управления низкоорбитальными КА вследствие увеличения зон видимости КА-абонентов КСР. Путем проведения траекторного контроля с использованием ретрансляционных радиолиний возможно уменьшить интервал прогнозирования параметров движения и тем самым повысить точность навигационного обеспечения решения целевых задач КА. Радиоканалы командно-измерительных систем непосредственного (прямого)

---

Чаплинский Владимир Степанович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, НИИ космических систем имени А.А. Максимова-филиал ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, тел. 502-83-40;

Шаститко Василий Александрович, старший научный сотрудник, НИИ космических систем имени А.А. Максимова-филиал ГКНПЦ им. М.В. Хруничева.

Chaplinsky Vladimir – dr. sci. tech., the professor, the main scientific employee, Scientific research institute of space systems of a name of A.A. Maksimova-branch GKNPTS of M.V. Hrunicheva. tel. 502-83-40;

Shastitko Vasily – the senior scientific employee, Scientific research institute of space systems of a name of A.A. Maksimova-branch GKNPTS of M.V. Hrunicheva.

управления КА с наземных пунктов и каналы ретрансляционного управления через спутники-ретрансляторы (СР) являются взаимно дополняющими друг друга.

В табл. 1 приведены оценки точности определения и прогнозирования параметров движения низкоорбитальных КА с высотой полета 250 км и 400 км (в орбитальной системе координат – по высоте  $r$ , вдоль орбиты  $l$  и в боковом направлении  $n$ ) соответственно при проведении ИТНП трехпунктным измерительным комплексом (Санкт-Петербург, Енисейск, Улан-Удэ) с измерительными системами типа «Компарус».

прогнозировании движения КА-абонента, естественно, не дает выигрыша по сравнению с решением задачи по прямым измерениям с наземных пунктов, однако обеспечивает приемлемую для большинства приложений точность на мерном интервале, который может быть приближен ко времени решения целевой задачи низкоорбитальным КА.

Значительные погрешности прогнозирования положения КА в ряде случаев, особенно для КА систем дистанционного зондирования земной поверхности, ограничивают возможности работы средств наблюдения и

Таблица 1

**Оценки точности определения и прогнозирования параметров движения низкоорбитальных КА по ИТНП трехпунктным измерительным комплексом с измерительными системами типа «Компарус»**

Орбита КА	Интервал прогнозирования	$r$ , км	$l$ , км	$n$ , км	$V_r$ , м/с	$V_p$ , м/с	$V_n$ , м/с
H=250км, наклонение 51 град	мерный	0,21	0,50	0,27	0,14	0,26	0,18
	12 часов	0,32	11,01	0,28	0,14	0,72	0,18
	1 сутки	0,42	37,80	0,29	0,15	1,23	0,18
	2 суток	0,53	164,1	0,30	0,16	2,30	0,18
H=400 км, наклонение 51 град	мерный	0,16	0,48	0,18	0,16	0,31	0,20
	12 часов	0,18	2,45	0,18	0,16	0,31	0,20
	1 сутки	0,23	7,99	0,19	0,16	0,31	0,20
	2 суток	0,33	28,13	0,19	0,16	0,46	0,20

Из приведенных оценок следует, что для КА с высотой полета 250 км погрешность прогнозирования положения КА вдоль орбиты за 12 часов возрастает по сравнению с мерным интервалом в 19...22 раза, а на суточном интервале в 42...75 раз (достигая 38...42 км), для КА с высотой полета 400 км в прогнозе на 12 часов - в 3,5...3,6 раза, на суточном интервале - в 8...12 раз (достигая 8...12 км).

Для полноты сравнительного анализа в табл. 2 приведены оценки погрешности определения и прогнозирования параметров движения низкоорбитальных КА только по ретрансляционным скоростным измерениям. Применение ретрансляционного режима ИТНП при

обуславливают необходимость уточнения прогноза. Данная задача может эффективно решаться на основе дополнительного проведения сеансов ретрансляционных скоростных измерений, которые практически не затрудняют информационный обмен по ретрансляционной радиолинии. Уточнение суточного прогноза параметров орбиты КА с высотами полета (H) 250 км и 400 км по обновительному циклу ретрансляционных измерений радиальной скорости с погрешностями – систематической 0,03 м/с и СКО 0,03 м/с, (три сеанса по 10 минут в начале, в конце зоны видимости КА со спутника-ретранслятора и в районе траверзы КА относительно геостационар-

Таблица 2

**Предельные погрешности определения и прогнозирования параметров движения низкоорбитальных КА по ретрансляционным скоростным измерениям при проведении ИТНП СР непосредственно перед ретрансляционными ИТНП**

Орбита КА	Интервал прогнозирования	$r$ , км	$l$ , км	$n$ , км	$V_r$ , м/с	$V_p$ , м/с	$V_n$ , м/с
H=250км, наклонение 51 град	мерный	0,28	1,88	1,16	0,31	0,65	1,34
	12 часов	0,43	14,50	1,20	0,31	0,82	1,39
H=400 км, наклонение 51 град	мерный	0,27	1,02	0,64	0,30	0,60	0,73
	12 часов	0,27	2,27	0,64	0,30	0,60	0,73

ного СР), проведенному спустя сутки после окончания цикла прямых траекторных измерений, позволяет снизить погрешность прогнозирования вдоль орбиты при  $H=250$  км до 1,3...2,6 км (вместо 38...42 км) и при  $H=400$  км до 0,7...1 км (вместо 8...12 км).

При этом точность прогнозирования положения КА по радиусу и в боковом направлении сохраняется на уровне, достигаемом на мерном интервале прямых измерений. Оценки прогноза положения КА после уточнения по ретрансляционным измерениям практически сохраняются в течение витка полета низкоорбитального КА, что создает хорошие предпосылки для их использования с целью управления работой целевых средств космического аппарата.

Существенным для организации процесса измерений текущих навигационных параметров средствами наземного комплекса управления является возможность получения приемлемых точностей определения и про-

ГК-54 ТС (ГК75-ТС), который имеет кратковременную нестабильность  $5 \cdot 10^{-12}$ . Масса герметизированного прибора 80г, он разрешен к применению в специальной аппаратуре.

Оснащение летательных аппаратов (ЛА) - ракетносителей, разгонных блоков и КА бортовой навигационной аппаратурой потребителей (НАП) средневысотных космических навигационных систем (КНС) существенно упрощает решение задач навигационного обеспечения полета низкоорбитальных ЛА. Орбитальная структура КНС Глонасс/GPS и используемые на борту космических навигационных аппаратов (КНА) антенные системы формируют сплошное навигационное поле (РНП) до высот 2-4 тыс.км над поверхностью Земли. Получаемая на борту внешнетраекторная навигационная информация о текущем положении и составляющих скорости может непосредственно использоваться в бортовой системе управления КА, а также в терминальной си-

Таблица 3

**Предельные погрешности определения и прогнозирования параметров околокруговой орбиты КА со средней высотой 1000 км и наклоном 83град по измерениям радиальной псевдоскорости и дальности и радиальной скорости с трех наземных пунктов**

Состав измерений	Интервал прогнозирования	$r$ , км	$l$ , км	$n$ , км	$V_r$ , м/с	$V_p$ , м/с	$V_w$ , м/с
$\dot{S}$	мерный	0,04	0,16	0,03	0,04	0,08	0,03
	2 суток	0,04	0,19	0,03	0,04	0,08	0,03
	10 суток	0,04	7,81	0,03	0,04	0,09	0,03
	15 суток	0,04	19,1	0,05	0,04	0,09	0,04
$L$ и $\dot{L}$	мерный	0,02	0,10	0,02	0,03	0,04	0,02
	2 суток	0,02	0,18	0,02	0,03	0,05	0,02
	10 суток	0,03	6,97	0,03	0,03	0,05	0,03
	15 суток	0,04	17,2	0,04	0,04	0,07	0,04

гнозирования параметров движения низкоорбитальных КА по беззапросным измерениям смещения несущей частоты принимаемого с КА радиосигнала (КИС типа «Компарус») в режимах совмещения с формированием информационных модулирующих сигналов для передачи телеметрической или командно-программной информации (табл.3). Численные значения погрешностей при использовании измерений радиальной псевдоскорости даже по однопунктным схемам вполне допустимы для решения прикладных задач. Режим измерения радиальной псевдоскорости предполагает применение в измерительных системах наземных и бортовых генераторов с относительной сеансной нестабильностью порядка  $10^{-11}$ . В настоящее время подобные генераторы разрабатываются, например, известной фирмой «Морион» (Санкт-Петербург). В частности, этой фирмой выпускается прецизионный малошумящий кварцевый генератор

стеме управления РН и РБ совместно с данными инерциальной системы навигации, обеспечивая повышение точности управления движением. Кроме того, данные НАП могут передаваться на Землю в составе информации телеконтроля с целью наблюдения за полетом РН, РБ и КА или использования совместно с данными наземных измерительных средств для повышения эффективности навигационного обеспечения полета.

Оценки точности определения и прогнозирования движения КА оптико-электронного наблюдения со средней высотой 550 км и наклоном 97 град при применении для навигационно-баллистического обеспечения полета навигационной аппаратуры потребителя космических навигационных систем приведены в табл.4. Оценки получены для полной орбитальной группировки КНС Глонасс при средней квадратической погрешности эфемерид навигационных КА по компонентам положе-

ния - радиусу, трансверсали и бинормали соответственно 1,4 м; 7 м и 7 м, по скоростным составляющим 0,1 мм/с; 0,2 мм/с и 0,4 мм/с и смещении бортовых шкал времени навигационных КА относительно системной шкалы не более 15 нс, в предположении погрешностей навигационных измерений псевдодальности 3м (систематика и СКО), радиальной псевдоскорости 1 см/с и 3 см/с (систематика и СКО). В этой же таблице приведены оценки предельных погрешностей в орбитальных параметрах КА в случае измерений трехпунктным комплексом только радиальной псевдоскорости с точностью, характеризующейся средней квадратической погрешностью 0,05м/с и сохранением постоянства неопределенной сеансной подставки с погрешностью 0,1 м/с.

шен до технологического, потребного для настройки целевой аппаратуры ДЗЗ.

Для траекторного контроля высокоорбитальных и геостационарных КА предпочтительны по информативности измерения координатных навигационных параметров – дальности и угловых координат. Широкое применение получили двух- трехпунктные схемы измерений дальности. Измерения проводятся в групповых сеансах, в каждом из которых измерительные системы наземных пунктов излучают сигнал запроса и проводят измерения последовательно. Геометрически подобный режим эквивалентен схеме засечек КА по измерениям дальности с разнесенных ИПов. Точностные возможности многопунктной схемы траекторного контроля геостационар-

Таблица 4

**Предельные погрешности определения и прогнозирования параметров орбиты КА ДЗЗ со средней высотой 550 км и наклонением 97,5 град**

Измерительный комплекс	Интервал прогнозирования	$r$ , км	$l$ , км	$n$ , км	$V_r$ , м/с	$V_p$ , м/с	$V_n$ , м/с
КНС «Глонасс»	мерный	0,055	0,090	0,055	0,065	0,060	0,062
	1 сутки	0,070	1,100	0,070	0,065	0,110	0,062
	2 суток	0,090	3,900	0,075	0,070	0,112	0,065
	5 суток	0,090	23,00	0,080	0,072	0,190	0,066
	10 суток	2,150	230,0	0,083	0,790	0,950	0,110
НКУ, 3 ИП, $\dot{S}$	мерный	0,061	0,260	0,051	0,055	0,104	0,098
	1 сутки	0,079	1,400	0,056	0,064	0,120	0,103
	2 суток	0,083	5,100	0,059	0,065	0,180	0,108
	10 суток	2,500	250,0	0,067	0,480	1,450	0,140

Оценки погрешностей определения параметров движения КА близки как на мерном интервале, так и при прогнозировании движения, однако использование в бортовой системе управления результатов навигационных определений НАП КНС принципиально исключает необходимость в длительном прогнозировании движения КА. Интервал прогнозирования может быть сокра-

ного КА с долготой подспутниковой точки  $\lambda = 47$  град, в.д. иллюстрируются данными табл.5 (для НКУ, включающего западный, центральный и восточный измерительные пункты с измерительной системой типа «Каштан» и НКУ, включающего только западный и восточный ИП). Близкие к приведенным оценки могут быть получены с использованием однопунктной дальномерно-угломерной

Таблица 5

**Оценки предельных погрешностей определения и прогнозирования параметров движения геостационарного КА с подспутниковой долготой 47 град.в.д.**

Измерительный комплекс	Интервал прогнозирования	$r$ , км	$l$ , км	$n$ , км	$\delta T$ , с	$\delta e$ , $10^5$	$\delta i$ , угл.с
НКУ, 3 ИП	мерный	0,08	0,20	0,57	0,27	0,21	2,86
	1 сутки	0,11	0,57	0,61	0,31	0,24	3,05
	3 суток	0,20	2,24	0,71	0,42	0,29	3,58
	5 суток	0,27	5,05	0,91	0,55	0,48	4,53
	7 суток	0,37	8,75	1,16	0,70	0,61	5,82
НКУ, 2 ИП	мерный	0,09	0,22	0,58	0,28	0,29	2,92
	1 сутки	0,12	0,61	0,65	0,33	0,33	3,28
	3 суток	0,22	2,30	0,85	0,45	0,40	4,31
	5 суток	0,30	5,21	1,09	0,60	0,58	5,52
	7 суток	0,39	8,97	1,35	0,73	0,72	6,78

системы с измерением угловых координат фазовым пеленгатором типа «Ритм» ( $\Delta \cos \alpha, \beta \leq 10^{-4}$ ) либо антенной измерительной системы в режиме автосопровождения КА ( $\Delta \alpha, \beta \leq 30-40$  угл. с).

В многопунктном измерительном комплексе траекторного контроля высокоорбитальных КА возможно применение технологии многопутевых измерений [1], объединяющей режимы запросных и беззапросных измерений. При этом один из наземных пунктов, условно – главный (ГИП) – излучает сигнал запроса и проводит измерение группового запаздывания дальномерного сигнала, т.е. работает в запросном режиме. Другие пункты наземного комплекса (ВИП), в зоне видимости которых находится КА, принимают сигнал ответа на запрос ГИП и проводят с использованием своего опорного сигнала измерение суммарной псевдодальности ГИП-КА-ВИП. Для пересчета псевдодальности в дальность осуществляется синхронизация и фазирование частотоподающих генераторов разнесенных измерительных пунктов с использованием сигналов космических навигационных систем Глонасс/GPS. Измерительный комплекс, включающий ГИП и один ВИП, разнесенные на три тыс.км, при проведении сеансов измерений через три часа в течение двух суток (с реализуемой точностью измерений) может обеспечить определение параметров геостационарной орбиты с предельными погрешностями не более 80 м по высоте и (260...650) м по трансверсали и бинормали, что позволяет эффективно решать задачи высокоточного удержания КА в выделенной области геостационарной орбиты.

Многопутевые навигационные измерения относятся к экономичным технологиям траекторного контроля КА, минимально использующим бортовой ресурс. Интервал времени, отведенный на групповой сеанс траекторных измерений многопунктовым наземным комплексом, используется наиболее полно, так как исключаются перерывы в получении измерений, связанные с переходом с одного наземного пункта на другой в запросном режиме. Учитывая слабую динамику относительно перемещения высокоорбитальных КА, продолжительность группового сеанса может быть сокращена до времени, обычно отводимого на работу одного пункта. Обеспечивается также экономия ресурса ВИП вследствие их работы только на прием сигнала.

Для навигационного обеспечения полета геостационарных КА в мировой практике началась отработка перспективной технологии применения бортовой НАП КНС, обеспечивающей проведение навигационных измерений в разрывном навигационном поле. В пределе дан-

ная технология позволяет автономно, на борту КА, решать задачи удержания геостационарного КА в выделенной рабочей области орбиты.

Для эфемеридно-временного обеспечения функционирования КА средневысотных космических навигационных систем получила распространение технология, основанная на проведении измерений параметров навигационных сигналов с пунктов слежения с известными геоцентрическими координатами, оснащенных высокостабильными хранителями частоты и времени.

### Выводы

Обобщение результатов исследований и практики навигационного обеспечения полета КА позволяет определить перспективные способы решения задач траекторного контроля околоземных летательных аппаратов космического назначения:

- оснащение низкоорбитальных КА бортовой навигационной аппаратурой потребителей средневысотных космических навигационных систем позволяет получить точность навигационного обеспечения полета, требуемую для решения целевых задач. Включение НАП в бортовую систему управления принципиально исключает необходимость в длительном прогнозировании движения КА. Интервал прогнозирования может быть сокращен до технологического, потребного для настройки целевой аппаратуры ДЗЗ. Для КА, оснащенных бортовой НАП КНС, средства дальномерно-скоростных измерений наземного комплекса управления могут использоваться для повышения надежности навигационного обеспечения полета;
- приемлемые для решения прикладных задач точности определения и прогнозирования параметров движения ряда низкоорбитальных КА, особенно малогабаритных (гидрометеорологических систем, систем связи, обзорного наблюдения, КА изучения природных ресурсов, экологического мониторинга, наблюдения океанов и ледовой обстановки, медицинских исследований, отработки технологических процессов и получения материалов в космосе, исследований космических излучений и околоземной плазмы) могут быть получены по беззапросным скоростным измерениям. Технология траекторного контроля низкоорбитальных КА по измерениям радиальной псевдоскорости, не накладывающая сколько-либо существенных ограничений по передаче информации, может стать основной при управлении КА данного класса. Измерения радиальной псевдоскорости могут также служить резервными для траекторного контроля КА, оснащенных НАП КНС. Режим измерения радиаль-

ной псевдоскорости предполагает применение в измерительных системах наземных и бортовых генераторов с относительной сеансной нестабильностью порядка  $10^{-11}$ . В настоящее время подобные генераторы для применения в космической технике разрабатываются;

- для низкоорбитальных КА-абонентов космической системы ретрансляции измерения навигационных параметров с использованием ретрансляционных радиолиний (преимущественно скоростных параметров) обеспечивают приемлемую для большинства приложений точность на мерном интервале, который может быть приближен ко времени решения целевой задачи низкоорбитальным КА. При совместном применении средств прямого и ретрансляционного контроля и управления исключается зависимость от пространственно-временных ограничений, присущих наземному комплексу прямого информационного обмена с КА; требуемые точности определения параметров движения КА могут быть достигнуты при существенно меньшей нагрузке средств непосредственного управления; исключается необходимость длительного прогнозирования движения и соответственно могут быть повышены точностные показатели навигации, а также может быть обеспечен оперативный контроль коррекции движения и пространственных маневров КА;

- для высокоорбитальных КА, включая геостационарные аппараты, наряду с однопунктной дальномерно-угломерной технологией и использованием НАП КНС в разрывном поле, перспективны технологии многопутевых навигационных измерений, которые относятся к экономичным, минимально использующим бортовой ресурс. Интервал времени, отведенный на групповой се-

анс траекторных измерений многопунктовым наземным комплексом, используется наиболее полно, так как исключаются перерывы в получении измерений, связанные с переходом с одного наземного пункта на другой в запросном режиме. Учитывая слабую динамику относительного перемещения высокоорбитальных КА, продолжительность группового сеанса может быть сокращена до времени, обычно отводимого на работу одного пункта. Обеспечивается также экономия ресурса ВИП вследствие их работы только на прием сигнала;

- бортовые систем управления движением средств выведения КА целесообразно создавать на принципах совместного использования внешнетраекторной информации, получаемой НАП КНС (работающей по сигналам КНС Глонасс и GPS), и данных инерциальной навигационной системы. Такая интеграция повышает достоверность работы НАП КНС и точность инерциальной системы. НАП должна быть двухдиапазонной - по массогабаритным параметрам она несущественно отличается от одночастотной, но позволяет просто и эффективно учитывать ионосферные погрешности, существенно ограничивающие точность навигационных измерений. Навигационная аппаратура потребителей КНС на средствах выведения (в особенности на разгонных блоках) должна функционировать как в сплошном, так и в дискретном навигационном поле космических навигационных систем ГЛОНАСС/GPS. В специализированных системах телеконтроля средств выведения целесообразно обеспечить дополнительное измерение радиальной псевдоскорости для повышения точности определения скоростных параметров движения РН и РБ.

#### Литература

1. Чаплинский В.С. Принципы многопутевых навигационных измерений космических аппаратов // Космос на страже Родины.- НИЦ «Космо», М. 1999, с. 301-311.

Материал поступил в редакцию 20. 10. 2011 г.