

УДК 621.396

© Чаплинский В.С., Милованов А.Г., Чобанян В.А., Шаститко В.А.  
Chaplinsky V., Milovanov A., Chobanyan V., Shastitko V.

**ТЕХНОЛОГИЯ ЮСТИРОВКИ СРЕДСТВ МНОГОПУТЕВЫХ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ГЕОПЕРЕХОДНЫХ ОРБИТАХ ПО НАВИГАЦИОННЫМ ДАННЫМ КНС ГЛОНАСС/GPS**

**TECHNOLOGY ADJUSTMENT MEANS MULTITRAVELLING TRAJECTORY MEASUREMENTS OF FLYING MACHINES IN GEOTRANSITIVE ORBITS ON NAVIGATING DATA SPACE NAVIGATING SYSTEMS GLONASS/GPS**

**Аннотация.** Обосновывается технология определения дальности и радиальной скорости по беззапросным многопутевым измерениям при траекторном контроле выведения космических аппаратов на геопереходные и геостационарные орбиты на участках, где бортовая навигационная аппаратура потребителя космических навигационных систем ГЛОНАСС/GPS не функционирует.

**Annotation.** The technology of definition of range and radial speed on not inquire to multitravelling measurements is proved at trajectory the control of deducing of space vehicles into geotransitive and geostationary orbits on sites where the onboard navigating equipment of the consumer of space navigating systems GLONASS/GPS does not function.

**Ключевые слова.** Космический аппарат, траекторные измерения, псевдодальность, радиальная псевдоскорость, юстировочные поправки, космическая навигационная система.

**Key words.** Space vehicle, trajectory measurements, pseudo-range, radial pseudo-speed, adjustment amendments, space navigating system.

При многопутевых траекторных измерениях летательных аппаратов (ЛА) радиотехническая измерительная система (РТС) одного из наземных пунктов измерительного комплекса (рис.1), условно – главного (ГИП), излучает сигнал запроса и проводит измерение группового запаздывания дальномерного сигнала и доплеровского смещения несущей частоты ответного сигнала, когерентно формируемой на борту КА, т.е. работает в обычном режиме. РТС других пунктов наземного комплекса, условно – ведомых (ВИП), в зоне видимости которых находится ЛА, измеряют групповое запаздывание дальномерного сигнала и смещение частоты принимаемого с борта сигнала ответа на запрос ГИП относительно своего опорного сигнала. Трасса запросного сигнала для

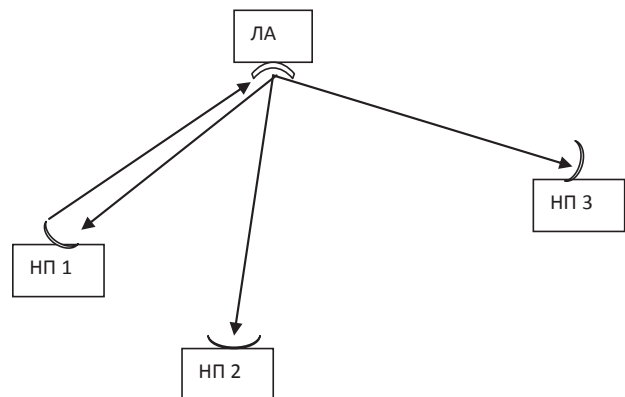


Рис. 1. Геометрическая схема измерительного комплекса при проведении многопутевых измерений

ГИП и всех ВИП общая. Ответный сигнал с борта ЛА распространяется к каждому ВИП по своему пути.

Начальные фазы запросного (на ГИП) и опорных

Чаплинский Владимир Степанович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, «НИИ КС имени АА. Максимова»-филиал ФГУП «ГКНПЦ им.М.В. Хруничева», тел. 8(495)502-83-40;

Милованов Александр Георгиевич – доктор технических наук, профессор, начальник отдела, ФГУП «ЦЭНКИ»;

Чобанян Владимир Аршалуйсович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, «НИИ КС имени АА. Максимова»-филиал ФГУП «ГКНПЦ им.М.В. Хруничева»;

Шаститко Василий Александрович – старший научный сотрудник, «НИИ КС имени АА. Максимова»-филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева».

Chaplinsky Vladimir – doctor of technical sciences, professor, senior researcher, "Research institute of space systems of the AA. Maximov-the branch of FSUE" «SSRPC of M.V. Kbrunichev», tel. 8 (495) 502-83-40;

Milovanov Alexander – doctor of technical sciences, professor, head of department, Federal state unitary enterprise "TSENKI";

Chobanyan Vladimir – doctor of technical sciences, professor, senior researcher, "Research institute of space systems of the AA. Maximov-the branch of FSUE" «SSRPC of M.V. Kbrunichev»;

Shastitko Vasily - senior researcher, "Research institute of space systems of the AA. Maximov-the branch of FSUE" «SSRPC of M.V. Kbrunichev".

(на ВИП) дальномерных сигналов различны, так как они формируются от независимых генераторов. Также и действительные значения несущей частоты (ДЗЧ) ведомых пунктов  $\omega_b$  отличны от ДЗЧ опорного сигнала ГИП  $\omega_r$ . Кроме того, пространственно разнесенные ВИП и ГИП обладают различной скоростью релятивистского смещения  $R_H$  ( $n = r, b$ ) своей шкалы времени. В совокупности эти факторы обуславливают определение по результатам измерений, проводимых на ВИП, суммарной радиальной псевдоскорости  $\dot{S}_{ГВ}$  ЛА относительно ГИП и ВИП

$$\bar{S}_{ГВ} = \bar{L}_{ГВ} - c \frac{\Delta\omega_{ГВ}}{\omega_B} + cR_B^r + \Delta\bar{L}_{П} \quad (1)$$

где  $\bar{L}_{ГВ}$  – среднее на интервале измерения  $(t_b + \tau_b, t_b)$  значение изменения за единицу времени суммарной дальности ГИП-ЛА-ВИП

$$\bar{L}_{ГВ} = \frac{1}{\tau_b} \int_{t_b}^{t_b + \tau_b} \frac{d[L_r(t) + L_b(t)]}{d\tau_b} d\tau_b;$$

$$\Delta\omega_{ГВ} = \omega_r - \omega_b;$$

$$R_B^r = \frac{\dot{r}_r^2 - \dot{r}_b^2}{2c^2} - \frac{\varphi_r - \varphi_b}{c^2};$$

где

$$L_r = |\vec{r}_k(t_k) - \vec{r}_r(t_r)|;$$

$$L_b = |\vec{r}_k(t_k) - \vec{r}_b(t_b)|,$$

$\vec{r}_r(t_r); \vec{r}_k(t_k); \vec{r}_b(t_b)$  – радиус-векторы ГИП, ЛА и ВИП на текущие моменты излучения сигнала с ГИП, его переизлучения ЛА и приема на ВИП;

$\dot{r}_r; \dot{r}_b$  и  $\varphi_r; \varphi_b$  – некоторые значения модулей геоцентрической скорости и гравитационных потенциалов ГИП и ВИП на интервале измерения, вычисляемые, например, на середину интервала;

$\Delta\bar{L}_{П}$  – скоростная компонента из-за распространения сигнала в ионосфере и тропосфере Земли.

В результаты непосредственных скоростных измерений на ВИП на  $i$ -х интервалах  $\dot{S}_{ГВи}$  вносятся поправки – априорные значения релятивистской скорости  $\tilde{R}_B^r$  и расчетные значения изменения скорости в среде распространения сигнала  $\Delta\tilde{L}_{П}$

$$\dot{S}_{ГВи}^* = \dot{S}_{ГВи} - c\tilde{R}_B^r - \Delta\tilde{L}_{П},$$

тогда аналоги исправленных измерений согласно (1) будут иметь вид

$$\bar{S}_{ГВи}^* = \bar{L}_{ГВи} - c \frac{\Delta\omega_{ГВи}}{\omega_B}. \quad (2)$$

Величина  $R_B^r$  зависит от взаимного положения ГИП и ВИП и при необходимости может быть вычислена с пренебрежимой погрешностью по данным об их геоцентрических высоте и скорости.

В общем случае коэффициенты  $\alpha_k$  аппроксимации на мерном интервале функции

$$\beta(t) = \frac{\Delta\omega_{ГВ}(t)}{\omega_B}; \quad (3)$$

$$\beta(t) = \alpha_1 + \alpha_2(\bar{t}_{n1} - \bar{t}_{n1}) + \dots + \alpha_m(\bar{t}_{n1} - \bar{t}_{n1})^{m-1}$$

должны включаться в состав уточняемых параметров, наряду с элементами орбиты. Для современных генераторов на мерном интервале продолжительностью около суток обычно можно ограничиться одним – двумя коэффициентами.

Аналогично, по измеренному на ВИП в некоторый момент времени  $t_{Bi}$  запаздыванию дальномерного сигнала, сформированного на ГИП, может быть определена не суммарная дальность, а суммарная псевдодальность  $S_{ГВи}$  ГИП-ЛА-ВИП

$$S_{ГВи} = (L_r + L_b)_i + c\Delta t_{ГВи} + \int_{t_{B1}}^{t_{Bi}} R_B^r(t) d\tau_b + \Delta L_{Пi}, \quad (4)$$

$$\text{где } \Delta t_{ГВи} = \frac{\psi_{0B} - \psi_{0r}}{\Omega_B} - \int_{t_{B1}}^{t_{Bi}} \frac{(\Omega_B - \Omega_r(t))}{\Omega_B} d\tau_b; \quad (5)$$

$\psi_{0B}$  и  $\psi_{0r}$  – фазы опорных дальномерных сигналов в момент начала накопления траекторной информации  $t_{B1}$ ;

$\Omega_B$  и  $\Omega_r$  – частоты опорного (на ВИП) и запросного (на ГИП) дальномерных сигналов;

$\Delta L_{П}$  – приращение суммарной дальности из-за распространения сигнала в тропосфере и ионосфере.

Таким образом, в текущий момент  $t_{Bi}$  суммарная псевдодальность  $S_{ГВи}$  помимо суммарной дальности  $L_{ГВи} = (L_r + L_b)_i$  будет отражать начальную разность фаз, а также набег фазы опорного сигнала ВИП относительно фазы опорного сигнала ГИП от момента времени измерений, принятый за начальный, обусловленный разностью ДЗЧ наземных генераторов ВИП и ГИП, и набег фазы от этого же момента за счет различной скорости релятивистского смещения шкал времени (ШВ) ГИП и ВИП.

Релятивистское смещение ШВ, как уже отмечалось, может быть вычислено по данным о положении ГИП и ВИП в геоцентрической системе координат и при необходимости учтено. Также с использованием модели среды распространения сигнала может быть вычислена и учтена величина  $\Delta\tilde{L}_{П}$ . Приращение суммарной псевдодальности  $S_{ГВи}$  за время  $\Delta T_i = t_{Bi} - t_{B1}$  вследствие разности ДЗЧ наземных генераторов пунктов можно выбором продолжительности интервала  $\Delta T_i$  ограничить уровнем флуктуационных ошибок измерений либо допустимой величиной погрешности. Следовательно, после ввода поправок суммарной псевдодальности

$$S_{ГВи}^* = S_{ГВи} - c \int_{t_{B1}}^{t_{Bi}} \tilde{R}_B^r(t) d\tau_b - \Delta\tilde{L}_{Пi},$$

будет соответствовать ее аналог

$$S_{ГВi}^* = (L_{Г} + L_{В})_i + c\Delta t_{ВГ}^*, \quad (6)$$

где  $\Delta t_{ВГ}^* = \frac{\psi_{0В} - \psi_{0Г}}{\Omega_{В}}$  – определяется неизвестной на-

чальной разностью фаз  $\psi$ - сигналов, которая должна включаться в состав уточняемых параметров. Заметим, что в состав уточняемых параметров в общем случае может быть включен и коэффициент, определяющий набег разности фаз из-за разности номиналов дальномерных сигналов [второе слагаемое формулы (5)].

Использование многопутевых измерений суммарной псевдодальности и радиальной псевдоскорости при решении задач навигационного контроля летательных аппаратов с включением в состав уточняемых параметров относительной разности начальных фаз дальномерных сигналов и частот генераторов ГИП и ВИП становится все менее эффективным по мере увеличения высоты орбиты вследствие малого изменения навигационных параметров на мерном интервале. Если же путем специальных измерений определить относительную разность начальных фаз дальномерных сигналов  $\Delta \bar{t}_{ВГ}^*$  и действительных частот генераторов ГИП и ВИП  $\frac{\Delta \bar{\omega}_{ГВ}}{\omega_{В}}$ , а затем учесть их в качестве юстировочных поправок  $\Delta \bar{t}_{ВГЮ} = \Delta \bar{t}_{ВГ}^*$  и  $\bar{\alpha}_{1ГВЮ} = \frac{\Delta \bar{\omega}_{ГВ}}{\omega_{В}}$ , соответственно, к измерениям суммарной псевдодальности и суммарной радиальной псевдоскорости, то с использованием беззапросных измерений будут определены значения суммарной дальности ГИП-ЛА-ВИП

$$(L_{Г} + L_{В})_i = S_{ГВi}^* - c\Delta \bar{t}_{ВГЮ} \quad (7)$$

и суммарной радиальной скорости ЛА относительно ГИП и ВИП

$$\bar{L}_{ГВi} = \bar{S}_{ГВi}^* - c\bar{\alpha}_{1ГВЮ}. \quad (8)$$

Погрешность определения этих навигационных параметров по сравнению с погрешностью запросных измерений дальности и радиальной скорости будет увеличена на величину погрешности определения юстировочных поправок. Главным же условием реализации многопутевых измерений является оснащение наземных измерительных пунктов высокостабильными генераторами сигналов – при  $\Delta \omega_{ГВ}/\omega_{В} = 3 \cdot 10^{-12}$  дополнительная погрешность скоростных измерений составит 0,9 мм/с, а дополнительная погрешность дальнометрии на мерном интервале в 6 часов может составить 20 м.

Фазирование и сличение частот генераторов (ФСЧГ) разнесенных измерительных систем может осуществляться различными способами в зависимости от их состава и конкретных условий функционирования. Регулярно и эффективно ФСЧГ может проводиться с использованием сигналов космических навигационных систем (КНС) ГЛОНАСС/GPS при условии дооснащения изме-

рительных систем (ИС) навигационной аппаратурой потребителя КНС и ее сопряжении с частотообразующей аппаратурой ИС [1].

Для многопутевых траекторных измерений ЛА, оснащенных навигационной аппаратурой потребителя (НАП) КНС (помимо бортовой аппаратуры самой системы траекторных измерений) и выводимых на геопереходные и геостационарные орбиты, существенное практическое значение имеет специальная технология ФСЧГ, основанная на использовании эталонных параметров орбиты ЛА, полученных по данным бортовой НАП КНС.

Суть данной технологии состоит в следующем. Выведение ЛА на геопереходные и геостационарные орбиты осуществляется путем последовательного формирования опорной, промежуточной, переходной и целевой – геопереходной либо непосредственно геостационарной орбиты. Полет по промежуточной орбите (либо на начальном участке переходной орбиты) проходит в зоне сплошного навигационного поля КНС, где обеспечивается возможность по данным НАП определить на мерном интервале параметры орбиты с высокой точностью. Если на этом мерном (юстировочном) интервале провести многопутевые траекторные измерения, выбрав из состава наземного измерительного комплекса ГИП и ВИПы, т.е. получить серию измеренных значений  $\bar{S}_{ГВi}^*$  и  $S_{ГВi}^*$ ,  $i=1, \dots, n$ , то окажется возможным определить серию значений

$$\frac{\Delta \omega_{ГВi}}{\omega_{В}} = \frac{1}{c} (\bar{L}_{ГВi} - \bar{S}_{ГВi}^*) \quad (9)$$

и

$$\Delta t_{ВГi}^* = \frac{1}{c} (S_{ГВi}^* - (\tilde{L}_{Г} + \tilde{L}_{В})_i), \quad (10)$$

где  $\tilde{L}_{ГВi}$  и  $(\tilde{L}_{Г} + \tilde{L}_{В})_i$  – расчетные значения этих параметров по «эталонной» орбите, полученной по НАП.

По сути значения величин (9) и (10) – это отклонения измерений от их аналогов по эталонной орбите. Юстировочные поправки определяются как оценки средних значений отклонений

$$\bar{\alpha}_{1ГВЮ} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \omega_{ГВi}}{\omega_{В}}; \quad (11)$$

$$\Delta \bar{t}_{ВГЮ} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta t_{ВГi}^*. \quad (12)$$

Полученные юстировочные поправки используются затем для определения значений суммарных дальностей ГИП-ЛА-ВИП и суммарных радиальных скоростей ЛА относительно ГИП и ВИП по соответствующим многопутевым беззапросным измерениям в сеансах связи с ЛА на участках полета, где данные НАП отсутствуют (для ряда НАП, не функционирующих вне сплошного навигационного поля КНС).

Погрешность определения юстировочных поправок в основном определяется погрешностью определения расчетных аналогов  $\tilde{L}_{ГВЮ}$  и  $(\tilde{L}_Г + \tilde{L}_В)_i$  по «эталонной» орбите, полученной по НАП. Величины погрешностей характеризуются значениями отклонений от эталонной орбиты измерений дальности и радиальной скорости, проведенных ГИП на юстировочном интервале

$$\delta\tilde{\alpha}_{ГВЮ} \leq 2 \frac{\Delta(\dot{L}_Г - \dot{\tilde{L}}_Г)}{c} \quad \text{и} \quad \delta\Delta\tilde{r}_{ВГЮ} \leq 2 \frac{\Delta(L_Г - \tilde{L}_Г)}{c} .$$

На данном этапе развития КНС ГЛОНАСС/GPS погрешность определения дальности и радиальной скорости по орбите, полученной по НАП, составляет 10–15 м и 1–2 см/с. Особенностью рассмотренной технологии является то, что для ее реализации не требуется сопряжение наземных станций измерительных систем с комплексами НАП КНС.

Для получения юстировочных поправок к многопутевым измерениям высокоорбитальных космических аппаратов может также использоваться технология, основанная на последовательном выполнении в сеансе измерений функций ГИП всеми наземными пунктами измерительного комплекса – «встречных измерений» (рис. 2). Пусть, например, в момент  $t_1$  запросный сигнал излучается с ИП-1, а ответный сигнал с КА принимается на ИП-2, а в момент  $t_2$  сигнал излучается с ИП-2, а принимается на ИП-1.

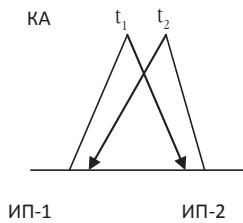


Рис.2. Встречные измерения

Тогда

$$S_{12t1} = (L_1 + L_2)_{t1} + c\Delta t_{21}^* \quad \text{и} \quad S_{21t2} = (L_2 + L_1)_{t2} + c\Delta t_{12}^*,$$

$$\Delta t_{21}^* = \frac{1}{2c} [(S_{12t1} - S_{21t2}) - \tilde{\Delta}(L_1 + L_2)_{t1}^2],$$

где  $\Delta t_{21}^* = \frac{\psi_{02} - \psi_{01}}{\Omega}$ ;  $\Delta t_{12}^* = \frac{\psi_{01} - \psi_{02}}{\Omega}$ ;

$\tilde{\Delta}(L_1 + L_2)_{t1}^2$  – априорное значение приращения суммарной дальности за интервал  $(t_2 - t_1)$ . Величина интервала между встречными измерениями может не превышать 1–2 мин. При этом погрешность определения приращения суммарной дальности окажется на уровне погрешности самих измерений.

**Литература**

1. Герастовский АВ., Чаплинский ВС. Коррекция беззапросных измерений дальности и радиальной скорости с использованием средневысотных навигационных систем. *Авиакосмическое приборостроение*, №8/2010, с.12-17.

Материал поступил в редакцию 09. 09. 2013 г.

Аналогичным образом определяется относительная разность номиналов частот генераторов ИП-1 и ИП-2

$$\frac{\Delta\omega_{12}}{\omega} = \frac{1}{2c} [ \tilde{\Delta}(\tilde{L}_1 + \tilde{L}_2)_{t1}^2 - (\tilde{S}_{12t1}^* - \tilde{S}_{21t2}^*) ],$$

где  $\tilde{\Delta}(\tilde{L}_1 + \tilde{L}_2)_{t1}^2$  – априорное значение приращения суммарной радиальной скорости за интервал  $(t_2 - t_1)$  – юстировочные поправки, полученные встречными суммарными измерениями в юстировочном сеансе, затем используются для определения суммарной дальности и суммарной радиальной скорости по многопутевым измерениям в последующих сеансах цикла навигационных измерений (рис.3). Технология определения юстировочных поправок на основе встречных измерений не предполагает

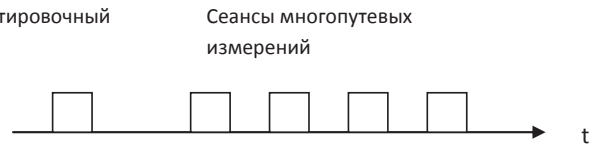


Рис.3. Цикл навигационных измерений

использование навигационного поля КНС.

**Заключение**

1. Технология определения юстировочных поправок, основанная на использовании эталонных параметров орбиты ЛА, полученных в зоне сплошного навигационного поля по данным бортовой НАП КНС, обеспечивает пересчет многопутевых суммарных измерений псевдодальности и радиальной псевдоскорости, проведенных наземными станциями измерительных систем, не сопряженных с НАП КНС, в соответствующие значения суммарной дальности и суммарной радиальной скорости при траекторном контроле выведения КА на геопереходные и геостационарные орбиты на участках, где бортовая навигационная аппаратура потребителя КНС не функционирует.

2. Технология получения юстировочных поправок, основанная на последовательном выполнении всеми наземными пунктами измерительного комплекса встречных многопутевых дальномерно-скоростных измерений в специальном юстировочном сеансе, обеспечивает определение суммарной дальности и суммарной радиальной скорости по многопутевым беззапросным измерениям в последующих сеансах цикла траекторных измерений высокоорбитальных космических аппаратов, не оснащенных навигационной аппаратурой КНС ГЛОНАСС/GPS.