

## НАВИГАЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

к.т.н. М.Ф. Белянский, В.Г. Макаренко, О.Е. Пастушенко  
(представил д.т.н., проф. О.Н. Фоменко)

Обосновывается вариант построения системы навигационно-баллистического обеспечения космических полетов, в которой наземные измерения первичных навигационных параметров дополняются данными от аппаратуры потребителя сетевых спутниковых радионавигационных систем типа "ГЛОНАСС", "НАВСТАР".

В настоящее время космические полеты невозможны без развитой системы навигационно - баллистического обеспечения (НБО). Классическим примером системы является разнесенная в пространстве сеть наземных пунктов, оборудованных соответствующими радиотехническими и/или оптическими локационными средствами, средствами передачи и обработки получаемой измерительной информации.

Обработанная информация в виде начальных условий или результатов прогноза движения передается потребителям баллистической информации и на борт космического аппарата (КА). По результатам обработки измерительной информации может быть спрогнозирован вектор состояния КА на последующие моменты времени, что позволяет спланировать работу служебной и специальной, бортовой и наземной аппаратуры и рассчитать данные, необходимые для их наведения и настройки. Кроме того, результаты сравнения заданного и фактического состояний бортовых подсистем используются для расчета управляющих воздействий, устраняющих выявленное рассогласование между оцениваемым и требуемым эффектом функционирования КА.

Использование нескольких, оптимальным образом рассредоточенных по земной поверхности, измерителей позволяет существенно повысить точность определения траекторий. Такая система не имеет ограничений на виды орбит, позволяет контролировать состояние объектов в значительной области приземного пространства, приближающейся по размерам к глобальной. Большие расстояния между измерителями в значительной мере смягчают временные ограничения зон видимости КА, обеспечивая непрерывность управления космическими средствами. Однако классическая схема НБО при неоспоримых преимуществах имеет и

существенные недостатки, вытекающие из особенностей строения системы.

Большая протяженность линий связи и наличие промежуточных звеньев приводит к низкой оперативности получения навигационной информации. Время передачи ( $t_{\Pi}$ ) измеренных параметров по каналам связи может быть определено из соотношения

$$t_{\Pi} = \frac{k \cdot \sum_{i=1}^m M_i \cdot f_i \cdot l_i}{N \cdot n} \cdot \tau_p,$$

где  $k$  - коэффициент, учитывающий перебои в связи;  $m$  - число типов измерительных средств, работающих по данному КА;  $M_i$  - число двоичных знаков в кадре измерительного средства;  $f_i$  - частота съема информации;  $l_i$  - число измерительных средств одного типа;  $N$  - пропускная способность канала связи;  $n$  - число параллельно работающих каналов связи;  $\tau_p$  - время работы измерительных средств.

Огромный объем информации, циркулирующей в контуре управления, вызывает определенные организационные трудности анализа, планирования и управления КА. Существенным недостатком является ограниченная пропускная способность системы. Высокая стоимость эксплуатации командно-измерительного комплекса, использующего наземную сеть измерительных пунктов, приводит к большим экономическим затратам на НБО космических полетов.

Указанных недостатков в значительной мере лишена однопунктная (малопунктная) технология управления КА, реализующая однопараметрический (радиально-скоростной) метод определения орбит. Однако, при малопунктной схеме НБО, для выполнения требований непрерывности, глобальности обслуживания КА, наземный сегмент необходимо дополнить группировкой КА на стационарных орбитах с периодом обращения, равным звёздным суткам, и с параметрами  $i=0^\circ$ ,  $e=0$ . Перспективная схема навигационно-баллистического обеспечения полётов КА приведена на рис. 1.

В общем случае точность измерения навигационных параметров можно оценить, используя соотношения:

$$\Delta q_i = \sum_n \frac{\partial q_i}{\partial h_n} \Delta h_n + R_{qi},$$

$$\sigma_{qi}^2 = \sum_n \left( \frac{\partial q_i}{\partial h_n} \right)^2 \sigma_n^2 + 2 \cdot \sum_n \frac{\partial q_i}{\partial h_n} \cdot \frac{\partial q_i}{\partial h_n'} r_{nn'} \sigma_{nn} \sigma_{nn'} + R_{qi}' ,$$

где  $q_i$  - элементы орбиты;  $n$  - число измеряемых параметров;

$\frac{\partial q_i}{\partial h_n}$  - частные производные определяемых параметров;

$r_{nn'}$  - коэффициенты корреляции;  $\Delta h_n, \sigma^2$  - медленно меняющаяся ошибка и дисперсия быстро меняющейся ошибки;  $R_{q_i}, R'_{q_i}$  - остаточные члены.

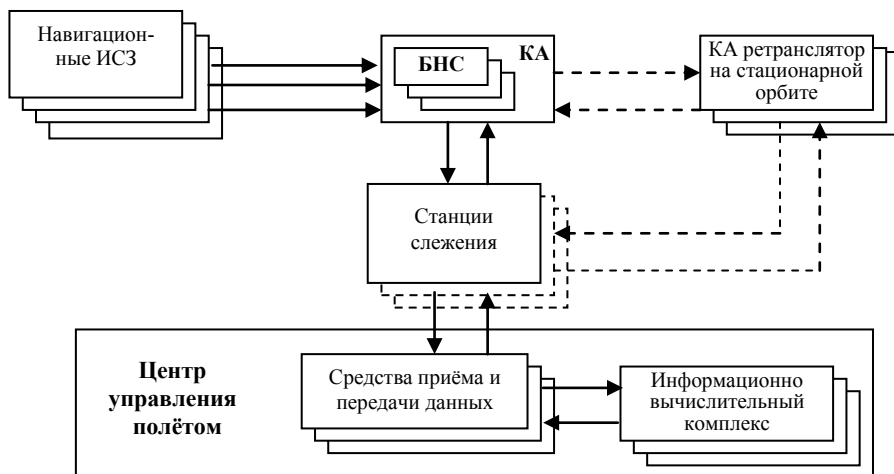


Рис. 1. Перспективная схема навигационно - баллистического обеспечения полётов КА (БНС - бортовые навигационные средства)

Следует заметить, что величины частных производных определяемых параметров по измеряемым зависят от расположения измерительного комплекса по отношению к плоскости движения КА [1,2].

Территориальные ограничения на размещение и количество измерительных пунктов приводят к невозможности использования в полной мере достоинств классической схемы НБО. В первую очередь это касается непрерывности, глобальности, оперативности обслуживания КА. Существенными так же являются ограничения на виды определяемых орбит и другие особенности, присущие данной технологии [2,5]. Недостатки существующих схем НБО можно устранить:

- а) расширением состава первичных навигационных параметров;
- б) объединением измерений одного и того же навигационного параметра, выполненных в разнесенных точках;
- в) увеличением точности измерителей.

Перспективным направлением преодоления рассмотренных ограничений является использование в контуре управления КА навигационных измерений по сетевым спутниковым радионавигационным системам

(ССРНС) [3]. Навигационно - баллистическое обеспечение с использованием ССРНС на всех этапах космического полета, начиная с вывода ракеты - носителя (РН) и заканчивая спуском КА, обеспечивает более высокую оперативность и надежность управления, а так же уменьшение числа привлекаемых траекторных измерительных средств, особенно при испытательных запусках РН и КА. Привлечение измерений, выполненных по навигационным ИСЗ (НИСЗ), наряду с традиционными траекторными измерениями наземных средств существенно улучшит сходимость навигационных алгоритмов. Размещение на объекте нескольких приёмных антенн, разнесённых на оптимальные расстояния, может быть использовано для определения пространственной ориентации КА.

Рассмотрим возможные реализации предложенных способов преодоления ограничений существующих систем НБО в контексте ССРНС. В первом случае измерение дальности, как и радиальной скорости возможно в случае установки на КА бортового навигационно-временного комплекса подобного специальной бортовой аппаратуре навигационных ИСЗ. Во втором случае выполнение траекторных измерений по сети НИСЗ вместо использования сети наземных измерительных пунктов делает возможным переход от используемых в настоящее время принципов командно – программно - временного управления функционированием КА к более перспективному координатно - временному управлению. Увеличение точности измерений первичных навигационных параметров возможно при измерении псевдодальности по фазе несущей частоты или путем использования специальных поправок от ККС, так называемого дифференциального режима

Навигационные определения могут осуществляться в режиме получения данных для последующей наземной обработки и в режиме оценивания в реальном времени. При этом может использоваться информация, полученная не только от ССРНС, но и от других источников: инерциальной системы, радиовысотомера, инфракрасного построителя вертикали, наземной ККС, и т. д. Необходимость в одновременном измерении навигационных параметров с помощью устройств и систем, работающих на разных физических принципах, обусловлена тем, что каждый измеритель в отдельности не удовлетворяет всем необходимым требованиям. Поэтому в системах навигации и управления комплексирование измерений заслуженно применяется для повышения точности, помехозащищенности и надежности оценки параметров движения [4].

Существуют различные методы обработки навигационных измерений: метод наименьших квадратов, метод максимума правдоподобия, метод максимума апостериорной вероятности, фильтр Калмана и др. [6]. Приведенный список методов линейной обработки навигационных сигналов позволяет заключить, что не существует универсального метода обработки, который можно рекомендовать как наилучший. Использо-

ние того или иного подхода зависит от вида решаемой навигационной задачи и следующих факторов:

- а) требуемой точности измерений и помехозащищенности приемного тракта;
- б) темпа поступающих измерений и быстродействия сигнальных процессоров;
- в) возможности получения надежных априорных оценок параметров измеряемых сигналов.

В случае однопунктной схемы управления КА сходимость навигационных алгоритмов и точность определения параметров движения зависят от взаимного расположения плоскости орбитального движения и навигационной точки, а так же вида орбиты [2]. Существуют такие геометрические конфигурации, вблизи которых решение навигационной задачи становится невозможным. Эффективным способом улучшения сходимости итерационного процесса является объединение измерений одной и той же величины, выполненных в пространственно - разнесенных точках. В этом случае применение спутниковой аппаратуры потребителя для определения параметров движения центра масс и ориентации КА по сигналам ССРНС, позволит обеспечить недостижимые до этого глобальность и непрерывность координатно-временных определений, а так же существенно уменьшить затраты на навигационно-баллистическое обеспечение космических полетов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сильвестров С.Д. Точность измерения параметров движения космических аппаратов радиотехническими методами. – М. : Сов. радио, 1970. – 320 с.
2. Шебшаевич В.С. Введение в теорию космической навигации. – М.: Сов. радио, 1971. – 295 с.
3. Космические навигационные системы / Под ред. Романова. – М. : МО РФ, 1994. – 632 с.
4. Белянский М.Ф., Агафонов Ю.Н., Пугачев Р.В., Соколов Д.А. Использование спутниковых навигационных систем для навигации высокоскоростных летательных аппаратов // Сб. научн. тр. ХВУ. – Харьков : ХВУ. – 1999. – С.78 - 81.
5. Эльясберг П.Е. Введение в теорию полёта искусственных спутников Земли. – М.: Наука, 1965. – 540 с.
6. Управление и навигация искусственных спутников Земли на околокруговых орбитах / Решетнев М.Ф., Лебедев А.А, Бартенев В.А. и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 336 с.

*Поступила в редколлегию 2.10.2000*

