В.В. Салов, кандидат технических наук,
доцент

Метод определения области для размещения мобильной командно-измерительной и приемо-передающей станции

Предлагаемый метод определения области для размещения мобильной командно-измерительной и приемо-передающей станции (КИППС) предназначен для повышения оперативности закладки рабочей программы с мобильной КИППС в бортовой комплекс управления космическим аппаратом (КА) и получения информации с КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а также способствует повышению точности решения задачи уточнения начальных условий движения КА путем измерения их текущих навигационных параметров с различных точек земной поверхности. Построен на основе анализа закономерностей движения КА относительно поверхности вращающейся Земли и особенностях баллистического обеспечения полетов КА.

Введение

В настоящее время большое внимание в области ракетно-космической техники уделяется повышению эффективности функционирования командно-измерительных и приемо-передающих станций (КИППС) в случаях сбора и обработки информации с зондируемого района (области пространства). При этом управление орбитальной группировкой КА РФ осуществляется со стационарных наземных пунктов, либо мобильными командно-измерительными системами наземных комплексов управления космическими аппаратами, которые располагаются на территориях РФ и некоторых стран СНГ [1]. В этом случае интервал времени от закладки рабочей программы управления специальной аппаратурой в бортовой специальный комплекс КА ДЗЗ до выполнения целевой задачи может составлять порядка нескольких часов. С момента зондирования района КА до передачи информации на пункт приема информации также может пройти несколько часов. Оперативность доставки информации в бортовой комплекс управления КА и на пункт приема информации, прежде всего, зависит от параметров орбиты и местонахождения КА ДЗЗ в конкретное время, а также расположения района наблюдения и командно-измерительных и приемо-передающих станций.

Расположение КИППС только на территории России и некоторых стран СНГ негативно сказывается и при решении задачи измерения текущих навигационных параметров для уточнения начальных условий движения КА. В СССР эту задачу решали размещением мобильных командно-измерительных комплексов и специальных комплексов космических средств на морских судах слежения и, с целью выполнения необходимых условий установления связи с космонавтами и проведения необходимых телеметрических измерений, определяли трассы полета космического корабля, зоны обзора и целеуказания судам слежения, перемещали суда слежения на трассы полета космического корабля в соответствии с определенными целеуказаниями [2]. Учитывая предназначение этих морских судов (в основном, для обеспечения пилотируемых космических кораблей) и их соответствующее расположение – по трассе полета конкретной космической станции, они не всегда имеют возможность оперативно получить информацию с КА о конкретном зондируемом районе, тем более при работе одновременно с несколькими КА ДЗЗ, трассы которых не совпадают.

Следует отметить, что на сегодняшний день функционирует всего один мобильный измерительный пункт, размещенный на корабле. Разработанный специалистами АО «Российские косми-

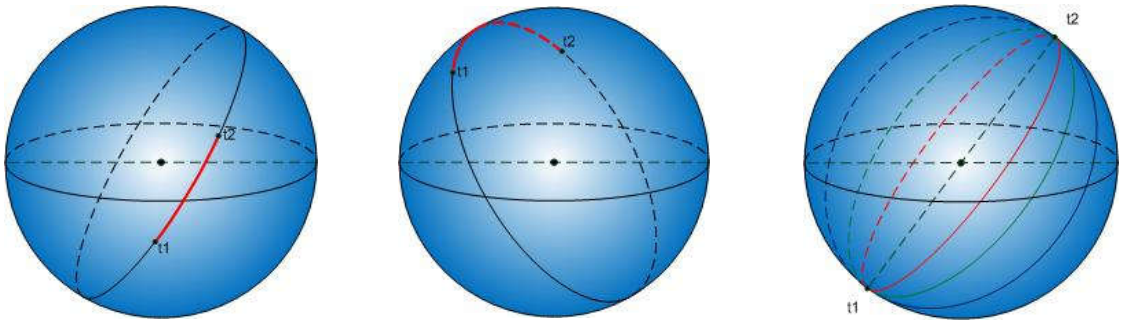
ческие системы» пункт морского базирования развернут на ледоколе «Адмирал Макаров» в Японском море на расстоянии около двух тысяч километров от космодрома Восточный. Первый сеанс приема телеметрической информации с МКС с помощью мобильного измерительного пункта осуществлен 17 июня 2015 года. В июле 2015 года пункт обеспечил сопровождение запусков транспортного грузового корабля «Прогресс М-28М» и пилотируемого корабля «Союз ТМА-17М» с космодрома Байконур.

Учитывая высокую динамику развития событий, происходящих в отдельных районах Земли (протекающие локальные войны и вооруженные конфликты, которые зачастую сопровождаются экологическими катастрофами техногенного характера, возникновения пожаров и подтоплений природного характера и т. п.), зачастую требуется провести наблюдение объектов конкретного района максимально оперативно [3], что не всегда представляется возможным осуществить, используя стационарные КИППС. Применение мобильных КИППС требует определения их размещения.

1. Метод определения области для размещения мобильной командно-измерительной и приемо-передающей станции.

Пусть условными границами задан зондируемый район или область пространства. Этот район или область пространства имеет геометрический центр, координаты которого назначаются или рассчитываются любым известным методом. Этому геометрическому центру однозначно соответствует единственная противоположная точка на земном шаре – географический антипод [4].

Известно, что через любые две точки на поверхности сферы, если они не прямо противоположны друг другу (то есть не являются антиподами), можно провести единственный большой круг (рисунки 1а, 1б). В то же время точки антиподы обладают уникальным свойством – между двумя точками-антиподами можно провести бесконечное количество больших кругов (рисунок 1в). Данным свойством и можно воспользоваться при определении расположения мобильной КИППС.



а) б) в)

Рисунок 1 – Расположение двух точек на поверхности сферы

Если Землю представить в форме шара и пренебречь ее вращением вокруг своей оси вследствие малости времени полета КА за половину периода его обращения вокруг Земли, то все трассы полета КА, проходящие через геометрический центр зондируемого района, будут пролегать в точке, являющейся антиподом геометрического центра этого района.

В этих условиях, располагая в антиподе геометрического центра зондируемого района мобильную КИППС, можно, если орбиты КА круговые (КА ДЗЗ в настоящее время функционируют, как правило, на околокруговых орбитах), за время, равное половине периода обращения КА вокруг Земли, заложить на его борт рабочую программу, а также принять специальную информацию с борта КА после пролета над зондируемым районом.

Если на карту мира нанести точки антиподы этой карты (рисунок 2)[1], то можно отметить, что, как правило, антиподальные точки суши попадают на водное пространство. В связи с тем, что потенциальные зондируемые районы в основном находятся на суше, является целесообразным мобильные КИППС устанавливать на морских судах для их размещения в окрестностях антиподов геометрическим центрам зондируемых районов.

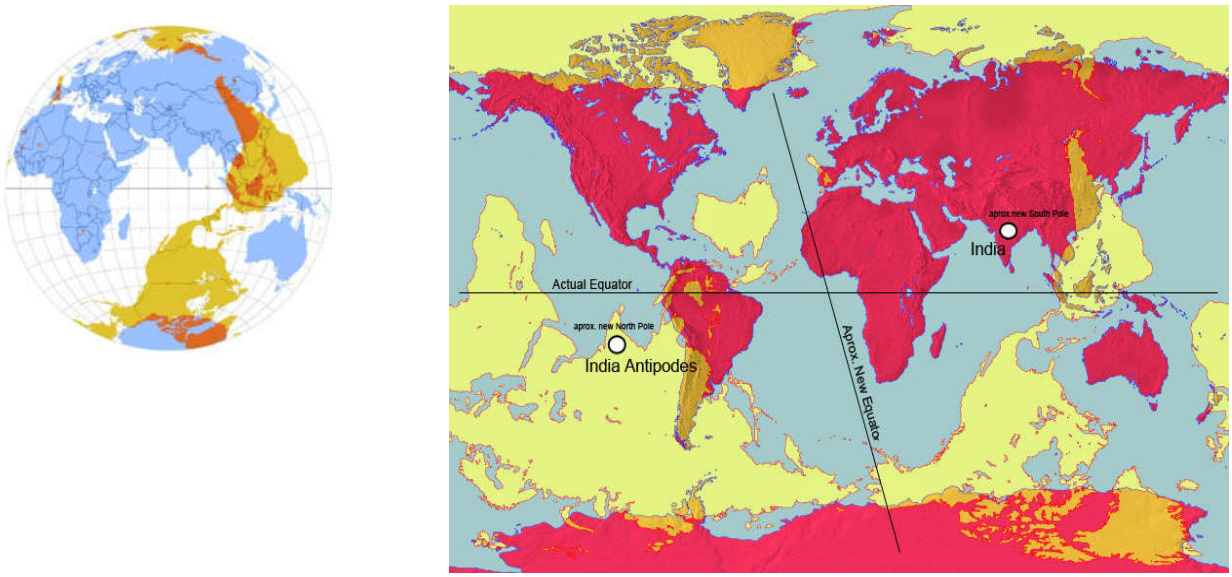


Рисунок 2 – Карта, показывающая антиподы каждой точки на поверхности Земли

Принимая форму Земли в виде эллипсоида и зная геодезические координаты геометрического центра заданного района $S_ц = \left| B_ц ; L_ц \right|$, геодезические координаты точки антипода $S^*_ц = \left| B^*_ц ; L^*_ц \right|$ можно вычислить по следующим формулам:

- геодезическая широта антипода:

$$B^*_ц = -B_ц ; \quad (1)$$

- геодезическая долгота антипода:

$$L^*_ц = \begin{cases} L_ц + 180\,°, & \text{если } L_ц \in [\,0\,;\,180°\,) \\ L_ц - 180\,°, & \text{если } L_ц \in [\,180°\,;\,360°\,) \end{cases}. \quad (2)$$

2. Расчетные соотношения к методу определения области для размещения мобильной командно-измерительной и приемо-передающей станции.

Пусть в момент времени t_0 КА находился в точке В (рисунок 3).

За время Δt КА пройдет по орбите угловое расстояние Δu, и если бы Земля не вращалась, он пришел бы в точку С (подспутниковая точка, соответствующая моменту времени $t_0 + \Delta t$).

С учетом вращения вокруг своей оси Земля за время Δt повернется на угол равный $\omega_з \Delta t$. В результате этого подспутниковая точка КА в момент времени $t_0 + \Delta t$ по геоцентрическому радиусу попадет не в точку *C* на той же широте, а в точку *C′*, находящуюся западнее на величину $\omega_з \Delta t$, так как точки трассы полета КА, функционирующих на круговых орбитах ближнего космоса, на вращающейся Земле находятся (для одних и тех же моментов времени) западнее точек трассы полета КА на невращающейся Земле.

1 www.ru.wikipedia.org/wiki/Антипод

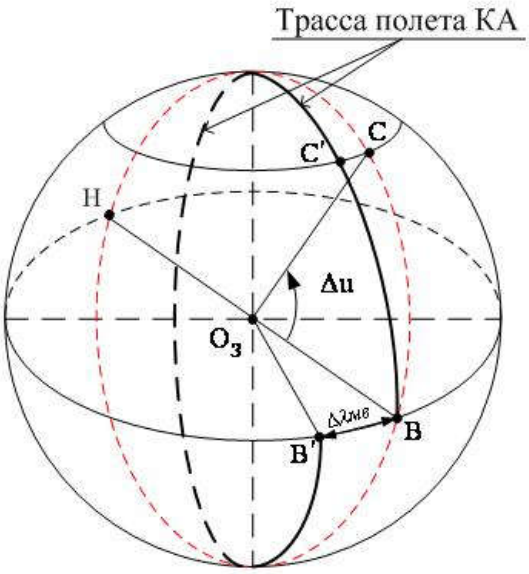


Рисунок 3 – Трасса полета КА с учетом вращения Земли

Угловая скорость вращения Земли вокруг своей оси $\omega_з$ определяется по формуле:

$$\omega_з = \frac{2\pi}{T_{зв}}, \tag{3}$$

где $T_{зв}$ – звездные сутки, $T_{зв} = 86164$ с.

Время Δt, соответствующее одному витку КА, равно драконическому периоду обращения КА – промежутку времени между двумя последовательными прохождениями КА одной и той же широты (например, экватора). Для определения драконического периода обращения КА можно воспользоваться формулой [5]:

$$T_{др} = T_0 \left\{ 1 + \frac{3}{2} c_{20} \left(\frac{a_э}{a_0} \right)^2 \left[3 - \frac{5}{2} \sin^2 i_0 - e_0 \cos\omega_0 \left(1 - 5\sin^2 i_0 \right) \right] \right\}, \tag{4}$$

$$T_0 = 2\pi \frac{a_0^{3/2}}{\sqrt{\mu}}, \tag{5}$$

где T_0 – оскулирующий период;

a_0, i_0, e_0, ω_0 – значения кеплеровских элементов орбиты в восходящем узле орбиты;

c_{20} – безразмерный коэффициент, учитывающий вторую зональную гармонику;

$a_э$ – экваториальный радиус Земли;

μ – гравитационная постоянная Земли.

Угловая скорость прецессии восходящего узла орбиты КА, обусловленная влиянием нецентральности гравитационного поля Земли, приближенно определяется по формуле:

$$\dot{\Omega} = \frac{\Delta\Omega_{1\,век}}{T_{др}}, \tag{6}$$

$$\Delta\Omega_{1\,век} = \frac{3\pi\pi_2 \cos i_0}{\mu p^2}, \tag{7}$$

где $\dot{\Omega}$ – угловая скорость прецессии восходящего узла орбиты;

$\Delta\Omega_{1\,век}$ – изменение прямого восхождения восходящего узла орбиты за один виток;

π_2 – постоянная, учитывающая полярное сжатие Земли;

p – фокальный параметр орбиты.

Учитывая вышесказанное, через промежуток времени, равный драконическому периоду обращения КА, подспутниковая точка сместится в западном направлении на угол, который называется межвитковым расстоянием и с учетом влияния нецентральности гравитационного поля Земли рассчитывается:

$$\Delta\lambda_{мв}=(\omega_з-\dot{\Omega})T_{др}. \quad (8)$$

Известно, что время полного оборота Земли относительно восходящего узла орбиты рассчитывается по формуле [6]:

$$T_{эф}=\frac{2\pi}{\omega_з-\dot{\Omega}}. \quad (9)$$

Таким образом, абсолютная величина межвиткового расстояния определяется по формуле:

$$\Delta\lambda_{мв}=2\pi\frac{T_{др}}{T_{эф}}. \quad (10)$$

Как отмечалось выше, через половину периода обращения КА его подспутниковая точка окажется в окрестности антипода геометрического центра зондируемого района, Земля при этом сделает поворот на угол:

$$\alpha=\frac{\Delta\lambda_{мв}}{2}=\pi\frac{T_{др}}{T_{эф}}. \quad (11)$$

Результаты расчетов показывают, что влияние $\dot{\Omega}$ на $T_{эф}$ несущественно. Так, при высоте круговой орбиты КА $H=300$км и $i=70°$ значение угловой скорости прецессии восходящего узла орбиты $\dot{\Omega}$ составляет примерно 0,18 градуса в сутки. То есть за орбитальные сутки вековой уход линии узлов составит примерно 11 угловых минут, что соответствует приблизительно 20 километрам. Половина периода обращения для данной высоты КА составляет около 45,187 минут. Это тот интервал времени, за который подспутниковая точка переместится от геометрического центра зондируемого района до его антипода, т. е. КА совершит половину витка. Значение $\dot{\Omega}$ для данного интервала времени составит примерно 0,005625 градуса в сутки, что соответствует уходу на 620 метров.

Таким образом, значением $\dot{\Omega}$ в рамках решения задачи определения расположения мобильной КИППС можно пренебречь и формула (9) примет вид:

$$T_{эф}\simeq\frac{2\pi}{\omega_з}. \quad (12)$$

Также в рамках выполнения сформулированной задачи драконический период обращения приближенно можно представить как:

$$T_{др}\simeq 2\pi\frac{a^{3/2}}{\sqrt{\mu}}, \quad (13)$$

где a – большая полуось орбиты КА.

Тогда с учетом (12), (13) выражение (11) примет вид:

$$\alpha\simeq\omega_з\pi\sqrt{\frac{a^3}{\mu}}\simeq\frac{2\pi}{T_{Зв}}\sqrt{\frac{a^3}{\mu}}. \quad (14)$$

Таким образом, при необходимости закладки на борт КА рабочей программы для проведения зондирования района с учетом вращения Земли мобильную КИППС надо размещать в точке с координатами:

$$S^*_{киппс}=\left\{B^*_ц; L^*_ц+\alpha\right\}. \quad (15)$$

Для получения информации с КА после зондирования района с учетом вращения Земли мобильную КИППС целесообразно размещать в точке с координатами:

$$S^*_{киппс} = \left| B^*_ц ; L^*_ц - \alpha \right| . \quad (16)$$

Следует отметить, что для круговой орбиты высотой 300 км: $\alpha \approx 11{,}32776°$, высотой 1000 км: $\alpha \approx 13{,}1567°$.

В связи с тем, что величина α мала по сравнению с зоной радиовидимости мобильной КИППС, его можно располагать в окрестностях точки антипода геометрического центра зондируемого района, учитывая при этом расположение спутников-ретрансляторов и зон взаимной видимости этих спутников с мобильной КИППС, а также обобщенной зоны видимости мобильной КИППС с заданными КА, функционирующими на различных высотах.

Таким образом, методика определения координат расположения мобильной КИППС включает в себя:

1. Задание широтно-долготных координат зондируемого района.

2. Расчет геометрического центра зондируемого района: $S_ц = \left| B_ц ; L_ц \right|$.

3. Расчет координат точки антипода геометрического центра зондируемого района: $S^*_ц = \left| B^*_ц ; L^*_ц \right|$.

4. Расчет межвиткового расстояния (сдвига) трассы полета КА.

5. Вычисление широтно-долготных геодезических координат центра области для размещения мобильной КИППС:

5.1. Для закладки рабочей программы на борт КА: $S^*_{пкис} = \left| B^*_ц ; L^*_ц + \alpha \right|$.

5.2. Для получения информации с КА после зондирования района: $S^*_{пкис} = \left| B^*_ц ; L^*_ц - \alpha \right|$.

6. Расчет обобщенной зоны видимости мобильной КИППС с заданными КА ДЗЗ.

7. Расчет долгот точек стояния КА-ретрансляторов, располагаемых на геостационарной орбите.

8. Определение допустимой области нахождения мобильной КИППС.

9. Выбор координат расположения мобильной КИППС в допустимой области нахождения.

Заключение

Учитывая закономерности движения КА относительно вращающейся Земли, размещая мобильную командно-измерительную и приемо-передающую станцию в окрестностях географического антипода геометрического центра зондируемого района или области пространства, можно в течение одного витка полета КА за время, не превышающее половины периода обращения КА, функционирующего на околокруговой орбите, от (до) момента пролета над зондируемым районом или областью пространства:

а) осуществить закладку программы на борт КА с целью выполнения целевой задачи, до пролета его над зондируемым районом или областью пространства;

б) осуществить прием информации с борта КА после зондирования заданного района, ее обработку и передачу через ретрансляторы;

в) осуществить проведение измерений текущих навигационных параметров в момент пролета КА в зоне радиовидимости мобильной командно-измерительной и приемо-передающей станции.

Размещая мобильные КИППС в соответствии с предложенным методом, имеется возможность их работы с различными типами КА, находящимися на орбитах с различными высотами и наклонениями (за редким исключением, например, с КА, функционирующими на геостационарных орбитах).

При размещении мобильной КИППС не в окрестности антипода геометрического центра зондируемого района или области пространства для осуществления указанных выше работ с КА потребуется либо несколько мобильных КИППС (с размещением их вдоль трасс полета конкретных КА до и после заданного района или области пространства), либо значительное время ожидания (от нескольких часов до нескольких суток) пролета КА через зону радиовидимости КИППС.

Таким образом, реализация предложенного метода позволяет повысить оперативность закладки рабочей программы с мобильной КИППС в бортовой комплекс управления КА и получения информации с КА ДЗЗ для обеспечения этой информацией заинтересованных потребителей, а также способствует повышению точности решения задачи уточнения начальных условий движения КА путем измерения их текущих навигационных параметров с различных точек земной поверхности.

Список использованных источников

1. Аверкиев Н.Ф., Салов В.В., Жаткин А.Т., Киселев В.В. Модификация баллистической структуры орбитальной группировки космических аппаратов на основе принципа оптимального управления // Известия вузов. Приборостроение. – 2014. – Т. 57 – № 7. – С. 23-25.

2. Бажинов В.П., Гаврилов В.П., Ястребов В.Д. Навигационное обеспечение полета орбитального комплекса «Салют-6» – «Союз» – «Прогресс». – М.: Наука, 1985. – С. 278, 322.

3. Аверкиев Н.Ф., Власов С.А., Салов В.В., Киселев В.В. Маневрирование космическим аппаратом с целью улучшения характеристик наблюдения района поверхности Земли // Известия вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58 – № 10. – С. 798-803.

4. Антиподы // Энциклопедический словарь, составленный русскими учеными и литераторами. Том IV / П.Л.Лавров. – СПб.: Тип. И. И. Глазунова и Комп., 1862. – С. 527.

5. Аверкиев Н.Ф., Богачев С.А., Васьков С.А., Власов С.А. Основы теории полета летательных аппаратов. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. –242 с.

6. Власов С.А., Мамон П.А. Теория полета космических аппаратов: Учебное пособие. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2007. – 435 с.