

А.В.Борисов

К ВОПРОСУ СИНТЕЗА ОРБИТАЛЬНЫХ СТРУКТУР СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

При баллистическом проектировании спутниковых систем (СС), предназначенных для дистанционного исследования Земли, одно из центральных мест занимает задача синтеза орбитальной структуры (ОС) при учете основных возмущающих воздействий, имеющих детерминированный характер. При этом ОС определяется общим числом космических аппаратов (КА) и их орбитальными параметрами в начальный момент времени, а возмущения — отливом поля притяжения Земли от центрального за счет полярного сжатия. При решении данной задачи обычно предполагается, что линия визирования (ЛВ) аппаратуры наблюдения КА имеет постоянную по времени ориентацию относительно местной вертикали. Однако полученные таким способом ОС обладают некоторой избыточностью, которая может быть вызвана как физическими (например, "сгущение" трасс КА у полюсов, увеличение ширины полосы обзора вдоль широты для круговых орбит при удалении от экватора и т.д.), так и методическими (вызванными несовершенством того или иного метода синтеза ОС) причинами. И, если методические причины в принципе могут быть устранены, то физические — носят объективный характер и в большей или меньшей степени присутствуют всегда. В связи с этим представляется целесообразным учитывать при синтезе ОС возможность согласованного управления ориентацией ЛВ аппаратуры наблюдения КА, входящих в состав СС, с целью повышения эффективности СС за счет снижения избыточности.

В данной работе приводится постановка задачи совместного синтеза ОС и законов управления ориентацией ЛВ, формулировки частных задач и схема их взаимосвязанного решения. Причем при неподвижности ЛВ относительно корпуса КА законы управления ориентацией ЛВ и КА эквивалентны.

Изложение ведется на примере СС, осуществляющей периодический обзор заданного широтного пояса Земли Φ , ограниченного нижней — $\varphi_{\text{Н}}$ и верхней — $\varphi_{\text{В}}$ геоцентрическими широтами. Параметры аппаратуры и условий наблюдения задаются вектором Γ , включающим одинаковые для всех КА

угол обзора бортовой аппаратуры - γ^* , минимальный угол возвышения КА над горизонтом - β_{\min} и максимальную дальность - D_{\max} . СС рассматривается на интервале времени $(0, T_{\text{сущ}}^*)$, на котором должна быть обеспечена периодичность обзора, характеризуемая временем разрыва наблюдения t_p , не менее заданной, т.е. на время разрыва наблюдения t_p наложено ограничение $t_p \leq t_p^*$. В результате решения задачи требуется определить вектор начальных орбитальных параметров - X^0 в момент времени $t=0$ и законы управления ориентацией ЛВ аппаратуры наблюдения - U , минимизирующие общее количество КА в СС - N . Таким образом, можно записать:

дано: t_p^* , $T_{\text{сущ}}^*$, $\Phi = (\varphi, \lambda | \varphi_N \leq \varphi \leq \varphi_B, 0 \leq \lambda < 2\pi)$, $\Gamma = (\gamma^*, \beta_{\min}, D_{\max})$;

ограничения: $t_p(N, X^0, U, \xi, t) \leq t_p^*$; $X = A_X(X^0, \xi, t)$; $t \in (0, T_{\text{сущ}}^*)$;

$$\xi \in \Omega_\xi ; U \in \Omega_U ; X^0 \in \Omega_{X^0} ; \quad (1)$$

определить: $(X^0, U)_{\text{opt}} = \arg \min_{X^0, U} N(X^0, U | \Phi, \Gamma, T_{\text{сущ}}^*, t_p \leq t_p^*)$;

$$N^{\text{opt}} = N(X_{\text{opt}}^0, U_{\text{opt}} | \Phi, \Gamma, T_{\text{сущ}}^*, t_p \leq t_p^*) ,$$

где φ, λ - геоцентрические широта и долгота; ξ - детерминированные возмущения, вызванные влиянием полярного сжатия Земли; A_X - оператор, позволяющий с учетом закономерностей орбитального движения КА определить ОС X в произвольный момент времени t ; $\Omega_\xi, \Omega_U, \Omega_{X^0}$ - области возможных значений возмущений, управлений и начальных орбитальных параметров. Под Ω_{X^0} понимаются ограничения, связанные с выбранным при синтезе тем или иным принципом построения СС (одномаршрутные СС, цепочки КА или кинематически правильные структуры).

В связи с тем, что оптимизационная задача (1) является в общем случае достаточно сложной, а искомые параметры X^0 и функции U имеют большую размерность и разнородный характер, она заменяется субоптимизацией, состоящей во взаимосвязанном решении более простых частных задач.

По аналогии с задачей синтеза ОС управляемой СС (где под управлением понимается изменение положения центра масс КА) задачу (1) можно разделить на традиционную задачу синтеза ОС при условии постоянства ориентации ЛВ и задачу определения законов управления ориентациями ЛВ для заданной ОС.

Задача синтеза ОС формулируется следующим образом:

дано: t_p^* , $T_{\text{сущ}}^*$, $\Phi = \{\varphi, \lambda \mid \varphi_H \leq \varphi \leq \varphi_B, 0 \leq \lambda < 2\pi\}$, $\Gamma = \{\gamma^*, \beta_{\min}, D_{\max}\}$;

ограничения: $t_p(N, X^0, \xi, t) \leq t_p^*$; $X = A_X(X^0, \xi, t)$; $t \in (0, T_{\text{сущ}}^*)$;

$$\xi \in \Omega_\xi; \quad X^0 \in \Omega_{X^0}; \quad (2)$$

определить: $X_{\text{opt}}^0 = \arg \min_X N(X^0 \mid \Phi, \Gamma, T_{\text{сущ}}^*, t_p \leq t_p^*)$;

$$N^{\text{opt}} = N(X_{\text{opt}}^0 \mid \Phi, \Gamma, T_{\text{сущ}}^*, t_p \leq t_p^*).$$

Задача управления в этом случае примет вид:

дано: $N, X^0, T_{\text{сущ}}^*$, $\Phi = \{\varphi, \lambda \mid \varphi_H \leq \varphi \leq \varphi_B, 0 \leq \lambda < 2\pi\}$, $\Gamma = \{\gamma^*, \beta_{\min}, D_{\max}\}$;

ограничения: $X = A_X(X^0, \xi, t)$; $t \in (0, T_{\text{сущ}}^*)$; $U \in \Omega_U$;

$$\xi \in \Omega_\xi; \quad X^0 \in \Omega_{X^0}; \quad (3)$$

определить: $U_{\text{opt}} = \arg \min_U t_p(U \mid \Phi, \Gamma, T_{\text{сущ}}^*, N, X^0)$;

$$t_p^U = t_p(U_{\text{opt}} \mid \Phi, \Gamma, T_{\text{сущ}}^*, N, X^0).$$

Кроме этого, целесообразно также сформулировать задачу анализа ОС СС, которая, с одной стороны, будет проверочной по отношению к (2), а с другой - облегчит решение задачи управления:

дано: $N, X^0, T_{\text{сущ}}^*$, $\Phi = \{\varphi, \lambda \mid \varphi_H \leq \varphi \leq \varphi_B, 0 \leq \lambda < 2\pi\}$, $\Gamma = \{\gamma^*, \beta_{\min}, D_{\max}\}$;

ограничения: $X = A_X(X^0, \xi, t)$; $t \in (0, T_{\text{сущ}}^*)$;

$$\xi \in \Omega_\xi; \quad X^0 \in \Omega_{X^0}; \quad (4)$$

определить: $t_p(\varphi)$; $t_p^{\text{в}} = \max_{\varphi} t_p(\varphi)$.

На рис. приведена укрупненная схема совместного синтеза ОС и законов управления ориентацией ЛВ аппаратуры наблюдения КА.

На этапе 1 решается задача (2) и определяется верхняя граница количества КА - N_1 , которая соответствует нулевому управлению. На этапе 2 та же задача решается в предположении скользящего режима управления, при котором происходит мгновенная переориентация ЛВ от одного крайнего положения до другого. При этом получается нижняя оценка количества КА - N_2 . Искомое N_{opt} будет находиться внутри диапазона (N_1, N_2) . Размер диапазона позволяет оценить предельно возможное повышение эффективности СС за счет управления ориентацией ЛВ. Этапы 3 и 4 служат для определения максимального количества итераций k для поиска N_{opt} и значения числа КА для первой итерации $N_{тек}$. При этом в качестве шага по N следует принять минимально возможное значение $dN=1$, чтобы не пропустить N_{opt} и не получить завышенный по N результат. На этапе 5 многократно решается задача (2), определяется зависимость $N(t_p)$, с помощью которой находится $t_p(N_{тек})$ и $X^O(N_{тек})$. Причем при определении зависимости $N(t_p)$ необходимое для этого число итераций удается существенно уменьшить за счет рационализации процесса вычислений, состоящей в получении точного вида этой зависимости только в окрестности значения $N_{тек}$. Этап 6 посвящен решению задачи анализа (4) - в результате получается зависимость $t_p(\varphi)$, позволяющая выделить тот поддиапазон широт, для которого целесообразно с помощью управления пытаться уменьшить t_p . На этапе 7 определяется минимальное время разрыва наблюдения, которое может быть обеспечено с помощью управления ориентацией ЛВ для текущего значения $N_{тек}$. Если оно меньше требуемого, то делается очередная итерация с меньшим количеством КА (этап 9 и переход к этапу 5). Если же полученное $t_p^u \geq t_p^*$, то это означает, что на предыдущей итерации было определено искомое минимальное количество КА - N_{opt} и соответствующие ему X^O_{opt} и U_{opt} .

Данный итерационный процесс (с шагом по N) в силу дискретного характера количества КА сходится к искомому решению за конечное число шагов, не превышающее k .

Схема совместного синтеза ОС и законов управления ориентацией ЛВ аппаратуры наблюдения

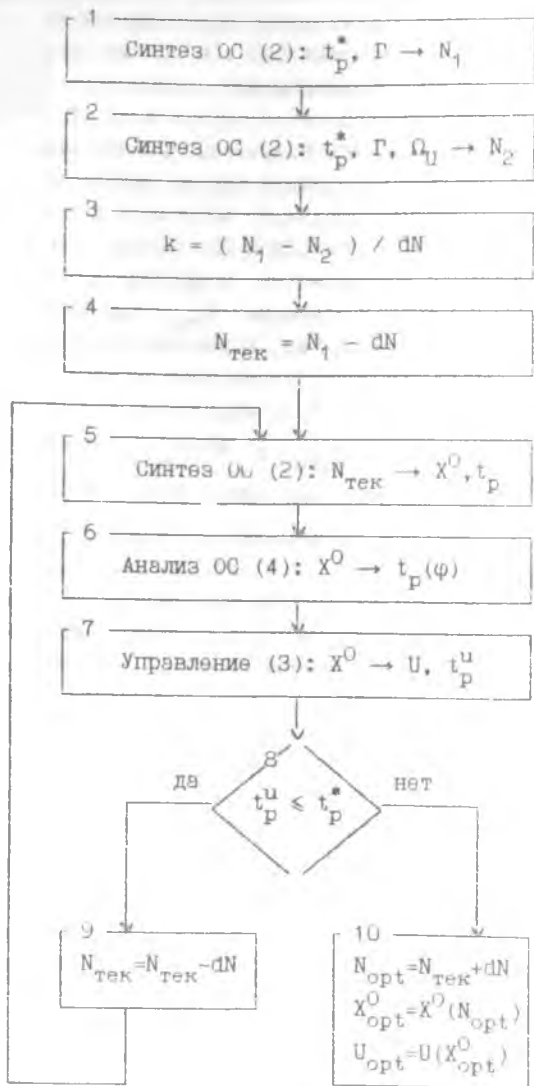


Рис.