

УПРАВЛЕНИЕ УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ БОЛЬШИХ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ С АКТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ

А.С. Ермилов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: yermas@ipu.ru

Ключевые слова: система управления угловой ориентацией, большая космическая конструкция, активная компенсация упругих колебаний.

Аннотация: Разработан алгоритм совместного оценивания в реальном времени координат углового движения больших космических конструкций (БКК) с гиросиловой стабилизацией (ГС) и тонов упругих колебаний конструкции, а также параметров тонов только по показаниям измерителей углового движения. Синтезирован алгоритм управления угловой ориентации при использовании в нем получаемых в реальном времени оценок координат тонов, который позволяет сократить по меньшей мере на порядок время влияния упругих колебаний на угловую ориентацию и стабилизацию БКК с ГС.

1. Введение

Большие космические конструкции (БКК) представляют собой крупногабаритную механическую систему, состоящую из соединённых между собой жёстких и упругих частей. Влияние колебаний упругих частей на общее угловое движение БКК в процессе угловой ориентации и стабилизации негативно сказывается не только на точности, качестве и длительности процессов управления ориентацией и прецизионной стабилизацией, но может привести к расходящимся колебаниям БКК. Так при математическом моделировании процесса управления угловой ориентацией БКК только по измерениям угла φ или, если возможно, то и дополнительно по $\dot{\varphi}$, без активной компенсации упругих колебаний, их затухание до 2-3% от начального значения максимальной амплитуды происходит за 5000-7000 секунд. С целью повышения безопасности эксплуатации подобных аппаратов необходима активная компенсация влияния упругих колебаний на динамику углового движения, что в свою очередь требует получение информации о координатах и параметрах упругих колебаний. Попытки измерения координат тонов упругих колебаний на борту и оценивание параметров упругих колебаний с помощью наземных испытаний и исследований не позволяют достичь требуемой точности. Получение информации об упругих колебаниях возможно за счет оценивания координат и параметров упругих колебаний с помощью алгоритмов фильтрации. Этот путь требует создания новых математических моделей углового движения БКК, в которых координаты и параметры упругих колебаний были бы полностью наблюдаемыми.

2. Совместное оценивание координат углового движения БКК и неизмеряемых координат упругих частей конструкции и идентификация их параметров

В работе [1] разработана математическая модель углового движения БКК с гиросиловой стабилизацией (ГС), которая позволяет совместно в реальном времени оценивать не только координаты углового движения БКК и неизмеряемые координаты тонов упругих колебаний, но и идентифицировать параметры тонов. Полученные уравнения углового движения БКК с ГС имеют вид

$$(1) \quad \begin{aligned} I_\phi \ddot{\varphi} - h\dot{\beta} &= 0, \quad I_\beta \ddot{\beta} + k_D \dot{\beta} + h(\dot{\varphi} - I_\phi^{-1} \sum_{i=1}^n \tilde{I}_i \dot{q}_i) = M_\beta(u), \\ (I_\phi - \sum_{i=1}^n a_i \tilde{I}_i) \ddot{q}_i + (I_\phi - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_j \tilde{I}_j) (b_i \dot{q}_i + c_i q_i) + \\ + a_i \sum_{j=1, j \neq i}^n \tilde{I}_j (b_j \dot{q}_j + c_j q_j) + a_i h \dot{\beta} &= 0. \\ \varphi &= \bar{\varphi} - I_\phi^{-1} \sum_{i=1}^n \tilde{I}_i q_i \end{aligned}$$

Здесь: I_ϕ – момент инерции корпуса БКК относительно центра масс; h – кинетический момент ГС; φ – угол отклонения корпуса от заданного направления в инерциальном пространстве; β – угол поворота ГС; I_β – момент инерции ГС относительно оси прецессии; k_D – коэффициент вязкого трения, $M_\beta(u)$ – управляющий момент ГС, u – управляющий сигнал на входе ГС, q_i – координата, характеризующая i -й тон упругих колебаний; a_i , b_i и c_i – параметры i -го тона упругих колебаний, n – число тонов; $\bar{\varphi}$ – угол поворота корпуса, вызванный вращением БКК как жёсткого объекта. Последнее уравнение системы (1) представляет собой модель измерений, в которую аддитивно входят координаты тонов упругих колебаний.

Так как априори необходимая информация о координатах и параметрах тонов упругих колебаний отсутствует, на основе нелинейного расширенного фильтра Калмана был разработан алгоритм совместного оценивания координат углового движения БКК и не измеряемых координат тонов упругих колебаний, а также идентификации их не наблюдаемых параметров [2].

Вектор состояния алгоритма совместного оценивания и идентификации включал в себя следующие координаты и параметры $X = (\bar{\varphi}, \dot{\varphi}, q_i, \dot{q}_i, \beta, \dot{\beta}, a_i, b_i, c_i)^T$, где $i = \overline{1, n}$. При этом предполагалось, что параметры a_i , b_i и c_i в течение процесса оценивания и идентификации постоянны, т.е. $\dot{a}_i = 0$, $\dot{b}_i = 0$ и $\dot{c}_i = 0$.

С целью исследования устойчивости, быстродействия, сходимости и точности синтезированного алгоритма было проведено статистическое математическое моделирование. Для сокращения времени моделирования каждого процесса оценивания и идентификации в математической модели БКК с ГС использовались только два тона, т.е. в уравнении (1) $n = 2$. При моделировании алгоритма совместного оценивания и идентификации в качестве модели углового движения БКК с ГС использовалась базовая математическая модель [1, 2], а в самом алгоритме совместного оценивания и идентификации разработанная математическая модель на основе фильтра Калмана (1). На рис. 1 представлены некоторые результаты математического моделирования.

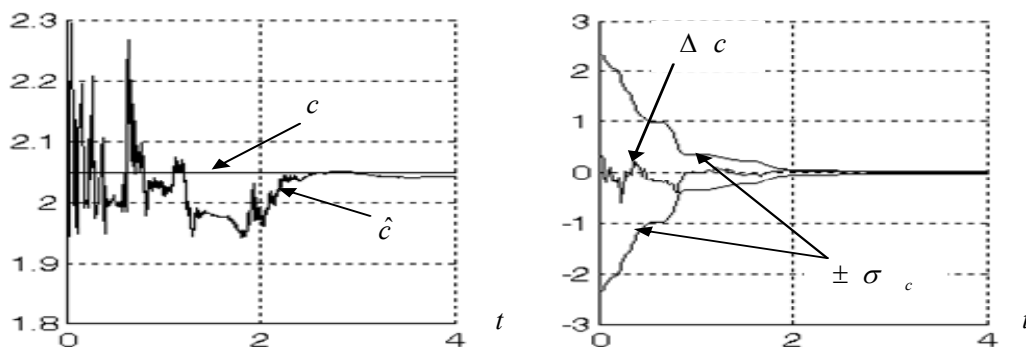


Рис. 1.

Здесь введены следующие обозначения: c – реальное значение одного из параметров, \hat{c} – оценка этого параметра, $\Delta c = c - \hat{c}$ – ошибка оценивания параметра, σ_c – среднеквадратическая ошибка оценивания параметра, получаемая как корень квадратный из соответствующего диагонального элемента ковариационной матрицы алгоритма совместного оценивания.

Математическое моделирование подтвердило высокие точность и быстродействие предложенного алгоритма совместного оценивания координат углового движения БКК с ГС и тонов упругих колебаний конструкции, а также идентификации параметров тонов. Точность полученных оценок координат углового движения БКК и тонов в 2% от максимального реального начального значения оцениваемых координат достигается за 10-12 секунд, параметров за 3 секунды.

3. Алгоритм управления угловой ориентацией и стабилизацией БКК с активной компенсацией упругих колебаний

Математическая модель углового движения БКК с ГС [1] позволяет понять не только причину медленного затухания колебаний упругих элементов конструкции БКК, но и предлагает способ быстрой компенсации влияния упругих колебаний. Из математической модели угла ориентации φ в виде аддитивной суммы угла поворота БКК как жесткого тела и координат тонов упругих колебаний со своими коэффициентами, деленными на момент инерции БКК следует, что при использовании измерения угла φ для формирования закона управления ориентацией коэффициенты усиления при тонах в несколько сот раз меньше чем основной коэффициент усиления, что и приводит к медленному затуханию упругих колебаний. Поэтому формируя в законе управления ориентацией вместо измеренного угла ориентации аддитивную сумму получаемых в реальном времени оценок угла поворота БКК $\hat{\varphi}$ как жесткого тела и координат тонов \hat{q}_i упругих колебаний со своими увеличенными коэффициентами $\tilde{K}_i \forall i = \overline{1, n}$, получаем закон управления ориентацией с активной ускоренной компенсацией упругих колебаний БКК (2).

$$(2) \quad \hat{u} = K \hat{\varphi} - I_{\varphi}^{-1} \sum_{i=1}^n \tilde{K}_i \tilde{I}_i \hat{q}_i.$$

С целью подтверждения возможности резкого сокращения времени затухания упругих колебаний, при использовании закона управления (2), было проведено математическое моделирование режимов угловой ориентации и стабилизации БКК с ГС с этим законом управления и сравнительное моделирование с использованием базового алго-

ритма управления $u = K(\hat{\varphi} - I_{\varphi}^{-1} \sum_{i=1}^n \tilde{I}_i \hat{q}_i)$, но с введением в этот закон оценок координат тонов, получаемых в реальном времени.

На рис. 2 представлены некоторые результаты сравнительного моделирования синтезированного и базового алгоритмов управления угловой ориентацией БКК.

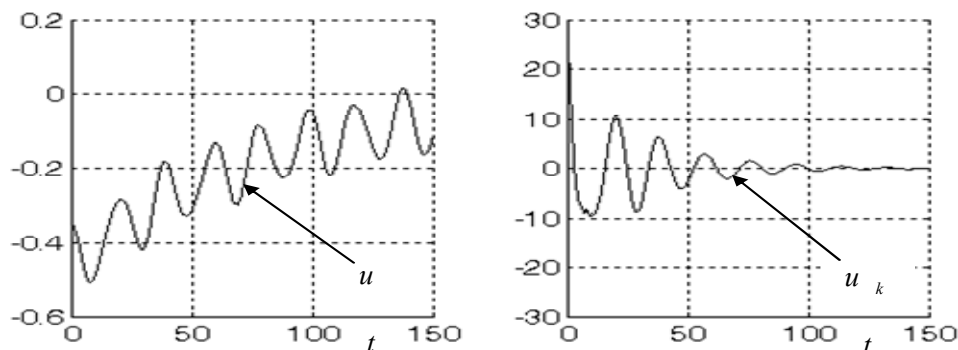


Рис. 2.

Как видно из графиков, активная компенсация упругих колебаний с помощью алгоритма управления (2) до 2-3% от начального значения максимальной амплитуды каждого тона, происходит за 110-140 секунд.

4. Заключение

Предложенный алгоритм управления ориентацией и стабилизацией БКК с ГС с активной компенсацией влияния упругих частей конструкции БКК на динамику углового движения за счет использования в нем оценок координат тонов увеличивает точность процессов ориентации и стабилизации и значительно (по меньшей мере на порядок) сокращает время компенсации упругих колебаний.

Список литературы

1. Ермилов А.С., Ермилова Т.В. Математическая модель углового движения больших космических конструкций с гироскопическим приводом для активной компенсации упругих колебаний // ДАН. 2011. Т. 436. № 6. С. 743-746.
2. Ермилов А.С., Ермилова Т.В. Оценивание ненаблюдаемых координат упругих колебаний больших космических конструкций с гиросиловым приводом // Автоматика и телемеханика. 2013. № 9. С. 143-156.