

Влияние упругих деформаций корпуса космического аппарата на точность ориентации целевой аппаратуры

Н.В. Рябогин¹, Н.М. Задорожная²

¹ ФГУП МОКБ «Марс», Москва, 127473, Россия

² НИИ ИСУ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Исследовано влияние упругих деформаций корпуса космического аппарата (КА) на точность наведения целевой аппаратуры (ЦА). Рассмотрена задача союстировки ЦА и звездных приборов в составе бортового комплекса управления КА. Подтверждена необходимость установки измерительных органов системы управления (СУ) космического аппарата на едином кронштейне с целевой аппаратурой.

E-mail: n.ryabogin@gmail.com, Zanatalie@yandex.ru

Ключевые слова: точность наведения, союстировка аппаратуры, звездные датчики.

Основной задачей системы управления (СУ) космического аппарата (КА) является наведение целевой аппаратуры (ЦА). Для повышения точности наведения проводится союстировка ЦА и звездных приборов в составе бортового комплекса управления КА. Наибольшей точности союстировки добиваются при установке измерительных органов СУ КА на едином кронштейне с целевой аппаратурой, что не всегда осуществимо. В случае отсутствия такой возможности неизбежно появляется негативное влияние упругих деформаций корпуса КА на точность ориентации ЦА.

Два звездных датчика (ЗД) — ЗД0 и ЗД1 установлены на различных кронштейнах КА, не связанных с ЦА (рис. 1). Оба прибора размещены в плоскости ZOY связанной системы координат (ССК) симметрично относительно оси Z ССК. Суммарное расстояние между ними вдоль оси Y составляет 1,2 м, расстояние от начала координат по оси Z — 2,5 м. В штатном режиме функционирования КА используется один звездный датчик, второй находится в «холодном» резерве.

На этапе летно-конструкторских испытаний (ЛКИ) выдается команда на одновременную работу двух приборов, но в контур управления передаются данные только одного ЗД.

Анализ телеметрической информации (ТМИ) при тестировании совместной работы звездных датчиков в течение полутора часов показал отклонение в установке приборов на КА и необходимость коррекции кватерниона установки звездных датчиков. Расхождение в показаниях приборов, приведенных на оси ССК КА, выражены в углах Эйлера (рис. 2).

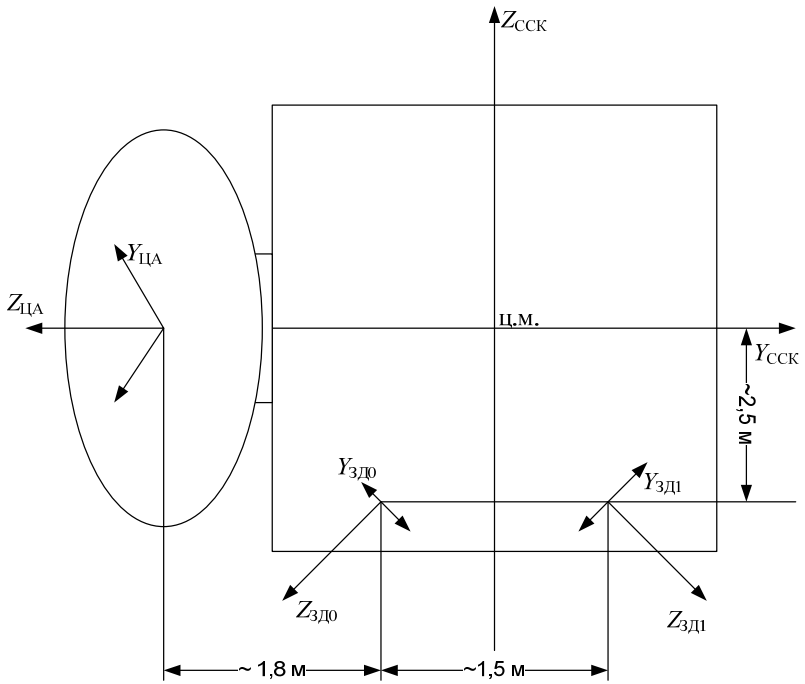


Рис. 1. Схема установки целевой аппаратуры и звездных датчиков на КА

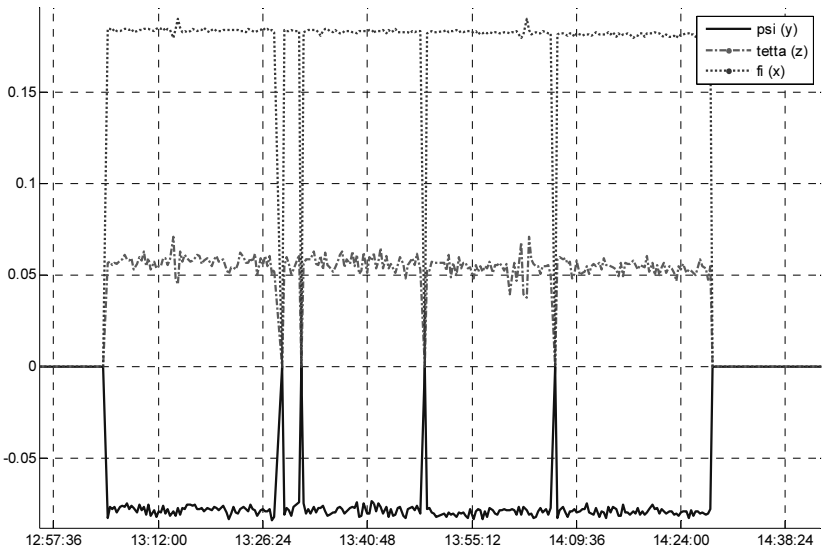


Рис. 2. Разность определения ориентации между ЗДО и ЗДІ в углах Эйлера, град

График (см. рис. 2) построен на основе штатной ТМИ, в которой измеренные кватернионы ориентации от разных ЗД разнесены во времени на 10 с, что накладывает дополнительную погрешность, равную приблизительно $0,04^\circ$. Для точного определения разности и привязки ЗД1 к ЗД0 необходим массив ТМИ, в котором данные об ориентации от звездных датчиков привязаны к одному моменту времени.

По полученным данным была проведена грубая привязка ЗД1 к ЗД0. После подстановки скорректированного кватерниона установки ЗД1 расхождение данных об ориентации от разных ЗД уменьшилось (рис. 3).

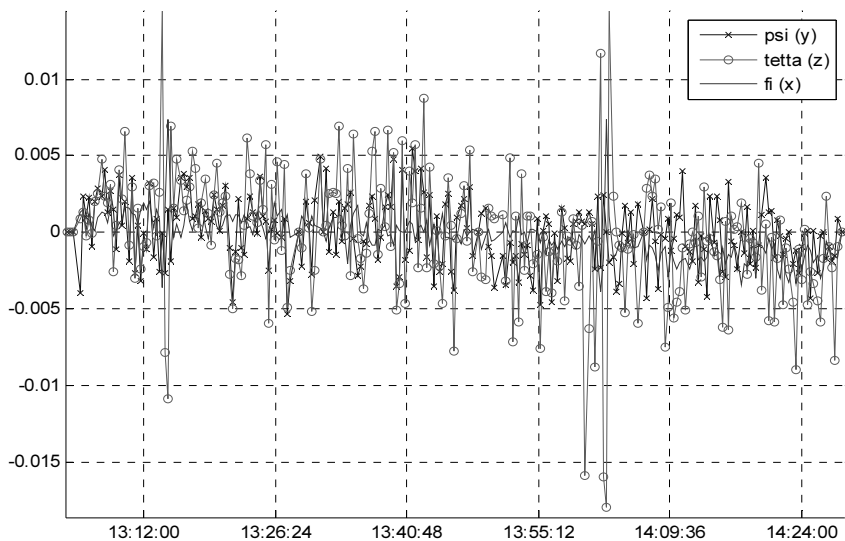


Рис. 3. Расхождение данных об ориентации от ЗД после корректировки, град

Привязка ЗД проведена из предположения, что переведенные к ССК кватернионы должны быть равны [1], т. е.

$$q_{ЗД0} \circ q_{ЗД0}^{ССК} = q_{ЗД1} \circ q_{ЗД1}^{ССК},$$

где $q_{ЗД0}$, $q_{ЗД1}$ — кватернионы ориентации, полученные от ЗД0 и ЗД1 соответственно; $q_{ЗД0}^{ССК}$, $q_{ЗД1}^{ССК}$ — кватернионы пересчета ориентации ЗД0 и ЗД1 на ССК, штатные значение которых:

$$q_{ЗД0}^{ССК} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,27563735581699916 \\ 0,96126169593831878 \end{bmatrix}; \quad q_{ЗД1}^{ССК} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -0,27563735581699916 \\ 0,96126169593831878 \end{bmatrix}.$$

Задача союстировки ЗД сводится к нахождению нового значения кватерниона перевода показаний ЗД1 на ССК $q_{ЗД1}^{ССК*}$. Значение кватерниона определяют из выражения [1]

$$q_{ЗД1}^{ССК*} = \tilde{q}_{ЗД1} \circ q_{ЗД0} \circ q_{ЗД0}^{ССК},$$

где $\tilde{q}_{ЗД1} = q_{ЗД1}^{-1}$, так как кватернион является нормированным.

В результате вычисления среднего значения кватерниона поправки из 350 точек получены следующие значения [2, 3]:

$$q_{ЗД1}^{ССК*} = \begin{bmatrix} 0,000660469712461305 \\ -0,000527520081057001 \\ 0,274099090891551 \\ -0,961701083432242 \end{bmatrix}.$$

На рис. 4 представлен график расхождения показаний ЗД, построенный по данным ТМИ на 12-часовом интервале. На рисунке видно, что кроме постоянной ошибки в установке ЗД, на расхождение данных об ориентации влияет некоторая переменная величина с периодом, близким к суткам. Учитывая характер изменения и тот факт, что основное влияние оказывается по осям Y и Z ССК, можно прийти к выводу о том, что суточное изменение расхождения показаний ЗД связано с температурными деформациями корпуса КА.

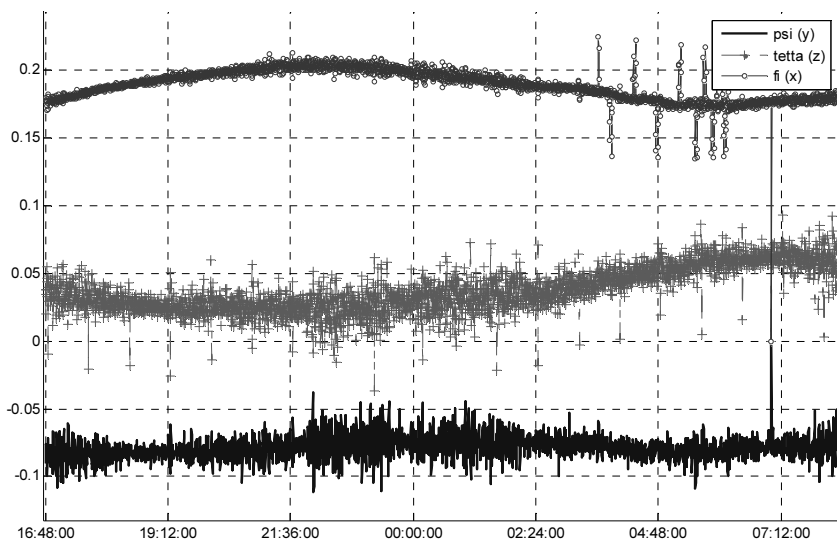


Рис. 4. Расхождение данных об ориентации между ЗД по ТМИ в углах Эйлера, град

При введении скорректированного кватерниона установки ЗД1, полученного по ТМИ, устраняется ошибка установки ЗД (рис. 5), но появляется некоторое смещение математического ожидания ошибки юстировки из-за того, что выборка получена на полуторачасовом интервале, в котором тепловые деформации корпуса КА не учитываются.

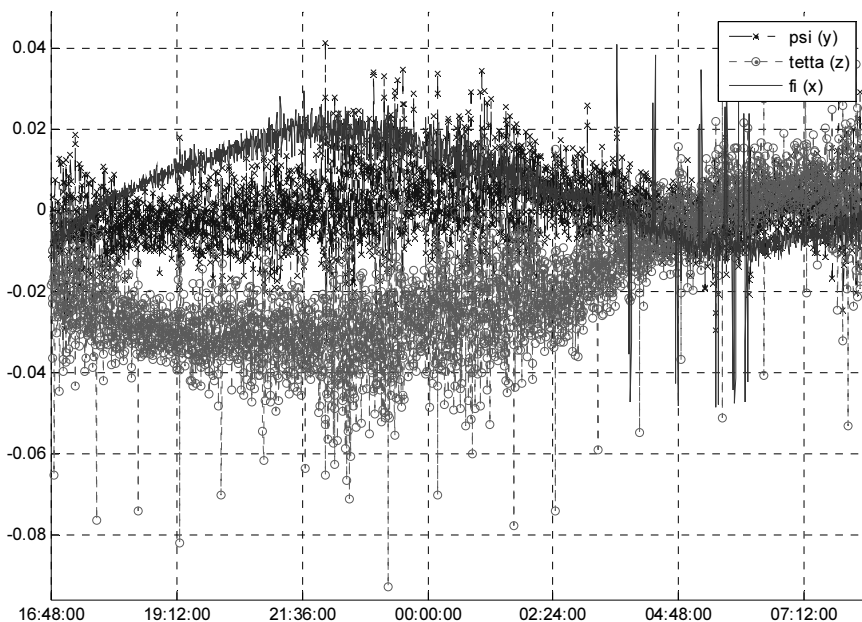


Рис. 5. Расхождение данных об ориентации при скорректированном кватернионе установки ЗД1, град

При корректировке кватерниона установки ЗД1 по суточной выборке, в которую входят тепловые деформации, постоянное смещение расхождения данных пропадает (рис. 6).

Таким образом, коррекцию кватернионов установки ЗД необходимо проводить на суточном интервале для компенсации СУ КА появления смещения ошибки между измерениями ЗД из-за влияния тепловой деформации корпуса КА.

Исходя из данных, полученных при анализе ТМИ, можно сделать вывод о негативном влиянии различных деформаций корпуса ЗД, в том числе и тепловых, на рассогласование измерительной информации от ЗД, приведенной к осям ССК. Очевидно, что полное устранение ошибки между измерениями ЗД, особенно во время разворотов КА, невозможно. Величина рассогласования систем координат различных приборов, в том числе ЦА, может достигать величины $0,04^\circ \approx 2,5$ мин, что существенно скажется на точности ориентации ЦА.

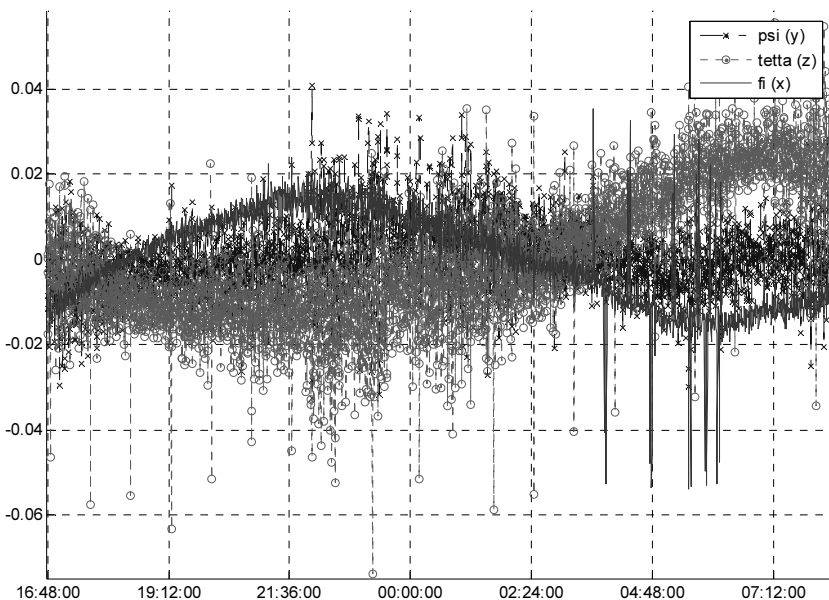


Рис. 6. Расхождение данных об ориентации при коррекции кватерниона установки по суточной выборке, град

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973. 320 с.
2. Сизиков В.С. Устойчивые методы обработки результатов измерений: учеб. пособие. СПб.: СпецЛит, 1999. 240 с.
3. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: в 2 т.: пер. с франц. М.: Мир, 1983. Т. 1. 312 с.

Статья поступила в редакцию 25.10.2012