

Боровков В.А., Мунтян Р.Ю., Филиппов В.С.

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА "РЕСУРС-ДК"

Космический аппарат (КА) "Ресурс-ДК" осуществляет полет с июня 2006 г. В бортовом комплексе управления КА функционирует система спутниковой навигации (ССН), работающая по радиосигналам ГЛОНАСС и GPS. В процессе полета из бортового в наземный комплекс управления КА для управления и анализа поступают навигационные векторы, полученные ССН. Рассматривается задача оценки точностных характеристик ССН без привлечения дополнительных измерительных средств.

Для нахождения статистической оценки точности навигационных векторов формируемых ССН в бортовом комплексе управления, предлагается провести статистическую обработку невязок (отклонений) в орбитальной системе координат (ОС) навигационных векторов относительно "эталонной" орбиты [1]. Под "эталонной" орбитой понимаются значения параметров движения центра масс (ПДЦМ) КА, полученные в результате совместной статистической обработки по методу наименьших квадратов выборки навигационных векторов на интервале работы ССН. Относительно этих "эталонных" параметров движения рассматриваются невязки каждого навигационного вектора, используемого при статистической обработке. Полученные невязки могут быть использованы для оценки СКО и корреляционных коэффициентов между отдельными составляющими параметров невязок [1], при этом ПДЦМ "эталонной" орбиты рассматриваются в качестве математического ожидания. Из навигационного приемника (НП) ССН поступают векторы навигационных решений $q(t_i) = (\bar{r}, \bar{v})|_{t_i}$ (\bar{r} – радиус-вектор, \bar{v} – вектор скорости, $i = 1, \dots, N$), формируемые НП в момент времени t_i (под навигационным решением понимается шестимерный вектор ПДЦМ, который формируется в НП по поступающим сигналам от спутниковой радионавигационной системы и может считаться измерением для ССН). ССН обрабатывает $q(t_i)$ и формирует шестимерный вектор-оценку ПДЦМ на момент времени t_N . После решения задачи численного навигационной оценки \tilde{q}_N для дальнейшего использования ее в структуре навигационного обеспечения она пересчитывается на любой заданный момент времени при помощи оператора прогнозирования $L(t^*, \tilde{q}_N)$. Данный оператор пересчитывает вектор \tilde{q}_N с использованием модели движения на момент времени t^* : $\tilde{q}(t^*) = L(t^*, \tilde{q}_N)$.

Необходимость в прогнозировании вектора навигационной оценки обусловлена перерывами в поступлении навигационных векторов измерений. Схема функционирования ССН в бортовом комплексе показана на рисунке 1.

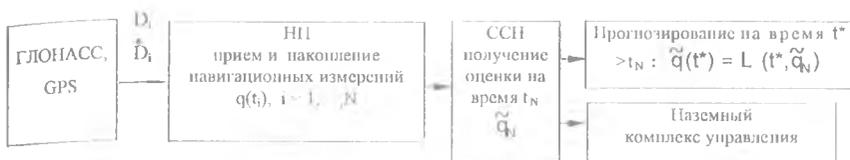


Рис. 1. Схема функционирования ССН

На момент t^* ковариационная матрица ошибок прогнозированной оценки \tilde{q}_N равна

$$K_{\tilde{q}}(t^*) = \Phi_{t^*t_N} K_{\tilde{q}}(t_N) \Phi_{t^*t_N}^T, \quad (1)$$

где $\Phi_{t^*t_N}$ – матрица прогноза, состоящая из частных (баллистических) производных от компонентов вектора $q(t^*)$ в момент времени t^* по компонентам вектора q_N в момент времени t_N . Эта матрица определяет соотношение между приращениями векторов: $\Delta q(t^*) = \Phi_{t^*t_N} \Delta q_{t_N}$.

На диагонали матрицы $K_{\tilde{q}}(t^*)$ стоят $\sigma_r^2, \sigma_\tau^2, \sigma_n^2, \sigma_{V_r}^2, \sigma_{V_\tau}^2, \sigma_{V_n}^2$ – дисперсии ошибок параметров вектора $\tilde{q}(t^*)$. По дисперсиям $\sigma_r^2, \sigma_\tau^2, \sigma_n^2$ вычисляются СКО координат навигационного вектора. Ковариационная матрица ошибок $K_{\tilde{q}}(t_N)$ равна

$$\text{на } K_{\tilde{q}}(t_N) = D R D, \quad \text{где } R = \begin{pmatrix} 1 & k_{r\tau} & k_{rn} & k_{rV_r} & k_{rV_\tau} & k_{rV_n} \\ k_{\tau r} & 1 & k_{\tau n} & k_{\tau V_r} & k_{\tau V_\tau} & k_{\tau V_n} \\ k_{nr} & k_{n\tau} & 1 & k_{nV_r} & k_{nV_\tau} & k_{nV_n} \\ k_{V_r r} & k_{V_r \tau} & k_{V_r n} & 1 & k_{V_r V_\tau} & k_{V_r V_n} \\ k_{V_\tau r} & k_{V_\tau \tau} & k_{V_\tau n} & k_{V_\tau V_r} & 1 & k_{V_\tau V_n} \\ k_{V_n r} & k_{V_n \tau} & k_{V_n n} & k_{V_n V_r} & k_{V_n V_\tau} & 1 \end{pmatrix} \quad \text{нормированная}$$

симметричная матрица с коэффициентами корреляции

k_{mp} ($m, p \in \{r, \tau, n, V_r, V_\tau, V_n\}; m \neq p$),

$$D = \begin{pmatrix} \sigma_r & 0 \\ 0 & \sigma_{V_n} \end{pmatrix} \quad \text{диагональная матрица с элементами из СКО.}$$

Элементы ковариационной матрицы ошибок $K_{\tilde{q}}(t_N)$ оценок \tilde{q}_N в ОСК вычисляются по полученной выборке невязок по известным соотношениям для дисперсии и корреляционных коэффициентов [2]. Статистическая обработка невязок относительно "эталонной" орбиты выборки из 40 навигационных векторов \tilde{q}_N с интервалом пример-

по в один виток, полученных в процессе полета, дала следующие значения матриц R и D :

$$R = \begin{pmatrix} 1 & -0,25 & -0,51 & 0,43 & -0,17 & -0,29 \\ -0,25 & 1 & 0,28 & -0,05 & 0,20 & 0,45 \\ -0,51 & 0,28 & 1 & -0,14 & -0,09 & 0,43 \\ 0,43 & -0,05 & -0,14 & 1 & -0,12 & -0,25 \\ -0,17 & 0,20 & -0,09 & -0,12 & 1 & 0,08 \\ -0,29 & 0,45 & 0,43 & -0,25 & 0,08 & 1 \end{pmatrix} \quad D = \begin{pmatrix} 17 & & & & & 0 \\ & 23 & & & & \\ & & 24 & & & \\ & & & 3 & & \\ & & & & 3 & \\ 0 & & & & & 2 \end{pmatrix}$$

Полученный уровень СКО может быть завышен, т. к. при статистической обработке навигационных векторов ССН с шагом в один виток на уровень невязок оказывают влияния ошибки модели движения.

По соотношению (1) вычислим матрицу $K_{\hat{q}}(t_N)$ при полученных значениях R и D с матрицей прогноза Φ_{t_N} на интервале в один виток. Уровень величин ошибок \hat{q} СКО по r, t, n равен 240, 1300, 80 м. Такой уровень ошибок определяется погрешностью измерений НП (без учета ошибок модели движения).

При проектной производительности НП формирует навигационные решения соответствующим СКО порядка 25, 25, 25 м, 4, 4, 4 см/с. Для сравнения при помощи соотношения (1) вычислим в прогнозе величины СКО по r, t, n при матрице R , равной единичной (коэффициенты корреляции равны нулю), и матрице D , соответствующей проектной производительности НП. При этом СКО ошибок компонентов навигационного вектора $\hat{q}(t^*)$ на время t^* будут равны соответственно 480, 2550, 100 м.

Таким образом, можно сделать вывод, что приведенные численные значения матриц R и D могут характеризовать усредненную производительность ССН (ее ковариационную матрицу ошибок: $K_{\hat{q}}(t_N)$) на КА "Ресурс-ДК" при данном уровне точностей навигационных измерений. Полученная ковариационная матрица может быть использована для анализа точности навигационного вектора в бортовом комплексе управления, при проектных обоснованиях параметров ССН, а также в навигационных алгоритмах наземного комплекса управления.

Библиографический список

1. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. – М.: Ветское радио, 1978.
2. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1964.