

УДК 621.37

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО ДАННЫМ ГЛОБАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ

Абросимов Д.В.

Предложена математическая модель процесса измерений радионавигационных параметров с целью оценивания его качества и анализа зависимости показателя качества от параметров модели. Показано, что, задаваясь значениями требуемого уровня показателя качества и директивной (предельно допустимой) погрешностью, можно определить затраты времени на определение координат летательного аппарата с требуемой точностью.

Введение

Выполнение летательным аппаратом (ЛА) процедур захода на посадку, в том числе в условиях сложной помеховой обстановки, требует обеспечения информационно-управляющего комплекса ЛА данными о его местоположении.

Одной из систем, входящих в бортовой навигационный комплекс, является блок спутниковой навигации, определяющий компоненты вектора координат объекта посредством обработки навигационных сигналов космических аппаратов глобальной спутниковой навигационной системы (ГНСС) ГЛОНАСС.

1 Обоснование показателя качества результатов

Учитывая малую мощность в точке приема излучаемого космическими аппаратами сигнала и связанную с этим уязвимость спутникового канала бортового навигационного комплекса к преднамеренным и непреднамеренным помехам, продолжительность получения навигационных данных \hat{t}_0 по спутниковому каналу без возникновения пауз является случайной величиной. Кроме того, всякое измерение неизбежно сопровождается случайной ошибкой. По полученным в течение времени \hat{t}_0 навигационным данным определяется значение координат $\pi(x, y, z)$ объекта с абсолютной величиной $\hat{\varepsilon}$ погрешности ($\hat{\varepsilon}$ – символ случайного объекта). Ввиду флуктуации полезного сигнала измерений и наличия шумов (помех) последовательность измерений координат случайным образом чередуется с пропусками. Затраты времени \hat{t} на определение текущих координат объекта включают время \hat{t}_0 измерений и время \hat{t}_1 задержки, возникающей вследствие пропусков измерений и сбоев аппаратуры, т.е.

$$\hat{t} = \hat{t}_0 + \hat{t}_1. \quad (1)$$

Таким образом, качество процесса определения координат $\pi(x, y, z)$ характеризуется вектором $(\hat{\varepsilon}, \hat{t})$.

2 Модель показателя качества

Как известно [1], качество целенаправленного процесса определяется качеством его результатов, которые в данном случае характеризуются точностью ($\hat{\varepsilon}$) и затратами времени ($\hat{\tau}$), необходимым для определения текущих координат. Поскольку вектор $\langle \hat{\varepsilon}, \hat{\tau} \rangle$ показателей качества результатов случаен, то комплексным показателем качества процесса является вероятность $P_{ВЗ}$ выполнения задачи (вероятность пригодности результатов операции), которая определяется выражением

$$P_{ВЗ} = P[(\hat{\varepsilon} \leq \varepsilon_d) \cap (\hat{\tau} \leq \tau_d)] = F_{\langle \hat{\varepsilon}, \hat{\tau} \rangle}(\varepsilon_d, \tau_d), \quad (2)$$

где ε_d и τ_d – предельно допустимые значения погрешности $\hat{\varepsilon}$ определения $\pi(x, y, z)$ и затрат времени $\hat{\tau}$ на его оценивание;

$F_{\langle \hat{\varepsilon}, \hat{\tau} \rangle}(\varepsilon, \tau)$ – функция распределения случайного вектора $\langle \hat{\varepsilon}, \hat{\tau} \rangle$ возможных результатов оценивания координат $\pi(x, y, z)$.

В рамках модели естественно предположить, что временная задержка $\hat{\tau}_1$ не зависит от значения погрешности $\hat{\varepsilon}$ определения координат.

Поскольку с ростом $\hat{\tau}_0$ и увеличением числа навигационных измерений точность определения координат растет, то при минимальных временных затратах τ'_0 погрешность $\hat{\varepsilon}$ максимальна и с увеличением $\hat{\tau}_0$ монотонно убывает. Систему измерений можно рассматривать как систему автоматического управления, в рамках которой погрешность $\hat{\varepsilon}$ является аналогом ошибки устойчивой линейной системы, описываемой дифференциальным уравнением [2] $\varepsilon(t) = -\beta\varepsilon(t)$, решение которого имеет вид $\varepsilon(t) = \alpha e^{-\beta(t)}$, где $\alpha = \varepsilon(0)$, а $t = \hat{\tau}_0 - \tau'_0$ или

$$\hat{\varepsilon} = \alpha \cdot \exp(-\beta(\hat{\tau}_0 - \tau'_0)), \quad (3)$$

где τ'_0 – минимальное значение технологического времени $\hat{\tau}_0$ измерений, по результатам которых возможно оценить значения компонент вектора π координат ЛА. Время τ'_0 характеризует вычислительную сложность измерений при данной технологии;

α – максимальное значение $\hat{\varepsilon}$ погрешности определения координат (при минимальном времени измерений равно τ'_0);

β – характеристика интенсивности проведения измерений координат π прибором.

Достаточно универсальной вероятностной моделью возможного значения технологического времени $\hat{\tau}_0$ измерений может служить четырехпараметрическое бета-распределение с параметрами τ'_0 , τ''_0 , η , ρ , а моделью времени $\hat{\tau}_1$ задержки – трехпараметрическое (смещенное) гамма-распределение с параметрами μ , κ , τ'_1 , позволяющими описывать широкие классы распределений. Заметим, что параметр τ'_1 (смещение) позволяет учесть также затраты времени на обработку результатов измерений и передачу координат $\pi(x, y, z)$ по каналу связи, если дисперсия этих временных затрат мала и их можно принять неслучайными.

Законы распределения случайных величин $\hat{\tau}_0$ и $\hat{\tau}_1$ имеют вид:

$$F_{\hat{\tau}_0}(\tau) = \frac{\tau - \tau'_0}{\tau''_0 - \tau'_0} \Pi(\tau, \tau'_0, \tau''_0) + \Delta(\tau - \tau''_0); \quad (4)$$

$$F_{\hat{\tau}_1}(\tau) = [1 - \exp(-\mu(\tau - \tau'_1))] \Delta(\tau - \tau'_1), \quad (5)$$

где $\Delta(x - a) = \begin{cases} 0, & \text{при } x \leq a, \\ 1, & \text{при } x > a \end{cases}$ – селектор луча $(a, \infty]$;
 $\Pi(x; a, b) = \Delta(x - a) - \Delta(x - b)$ – селектор интервала $(a, b]$.
 Тогда при $\eta = \rho = 0$ и $\kappa = 1$ из (1)-(4) следует

$$\begin{aligned}
 P_{ВЗ} &= F_{(\hat{\varepsilon}, \hat{\tau})}(\varepsilon_d, \tau_d) = \\
 &= \frac{1}{\tau_0'' - \tau_0'} \left\{ \tau_d - \tau_0' - \tau_1' - \frac{1}{\beta} \ln \frac{\alpha}{\varepsilon_d} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{\mu} \left[1 - \exp \left(-\mu \left(\tau_d - \tau_0' - \tau_1' - \frac{1}{\beta} \ln \frac{\alpha}{\varepsilon_d} \right) \right) \right] \right\} \\
 &\quad \prod (\varepsilon_d; \alpha \exp(-\beta(\tau_d - \tau_0' - \tau_1')), \alpha) \\
 &\quad \prod (\tau_d; \tau_0' + \tau_1', \tau_0'' + \tau_1') + \\
 &\quad + \frac{1}{\tau_0'' - \tau_0'} \left\{ \tau_0'' - \tau_0' - \frac{1}{\beta} \ln \frac{\alpha}{\varepsilon_d} - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{\mu} \left[\exp(-\mu(\tau_d - \tau_0'' - \tau_1')) - \exp \left(-\mu \left(\tau_d - \tau_0' - \tau_1' - \frac{1}{\beta} \ln \frac{\alpha}{\varepsilon_d} \right) \right) \right] \right\} \times \\
 &\quad \times \prod (\varepsilon_d; \alpha \exp(-\beta(\tau_0'' - \tau_0')), \alpha) \Delta(\tau_d - \tau_0'' - \tau_1'). \quad (6)
 \end{aligned}$$

Выражение (6) является математической моделью показателя $P_{ВЗ}$ качества процесса навигационного обеспечения ЛА.

3 Методика оценивания качества

При проведении исследований, как правило, качество целенаправленного процесса оценивается по критерию G пригодности [1], имеющего следующую математическую формулировку:

$$G: P_{ВЗ} \geq P_{ВЗ}^{тр}, \quad (7)$$

где $P_{ВЗ}^{тр}$ – требуемое (минимально допустимое) значение показателя $P_{ВЗ}$ качества.

Методика включает 3 этапа:

1. Определение значения $P_{ВЗ}$ по формуле (6);
2. Реализация критерия пригодности (7);
3. Формулировка вывода о пригодности процесса навигационного обеспечения ЛА.

4 Пример оценивания и анализа качества

Большой практический интерес представляет исследование характеристик влияния параметров блока навигации и технологии измерений на качество процесса измерений. При этом коэффициент $V_{x_i}^p$ влияния параметра x_i на показатель $P_{ВЗ}$ определяется выражением

$$V_{x_i}^p = h_{x_i}^p x_i = \frac{\partial P_{B3}(X_{<k>}^0)}{\partial x_i} x_i, i = 1(1)K, \quad (8)$$

где $h_{x_i}^p x_i$ – коэффициент чувствительности показателя P_{B3} к параметру x_i [2];

$X_{<k>}^0 = \langle x_1^0, x_2^0, \dots, x_k^0 \rangle$ – вектор номинальных значений параметров.

На плоскости $\tau_d \theta \epsilon_d$ может быть построено семейство кривых уровня вероятности P_{B3}^r выполнения задачи оценивания координат объекта π (рисунок 1). Данные кривые представляют собой компромиссные кривые Парето в пространстве $\tau_d^r \theta \epsilon_d^r$ гарантируемых с вероятностью P^r предельных значений ϵ^r , τ^r погрешности $\hat{\epsilon}$ и затрат времени $\hat{\tau}$ на определение текущих координат объекта и позволяют проводить содержательный анализ зависимости качества процесса измерений от требований, предъявляемых к его результатам.

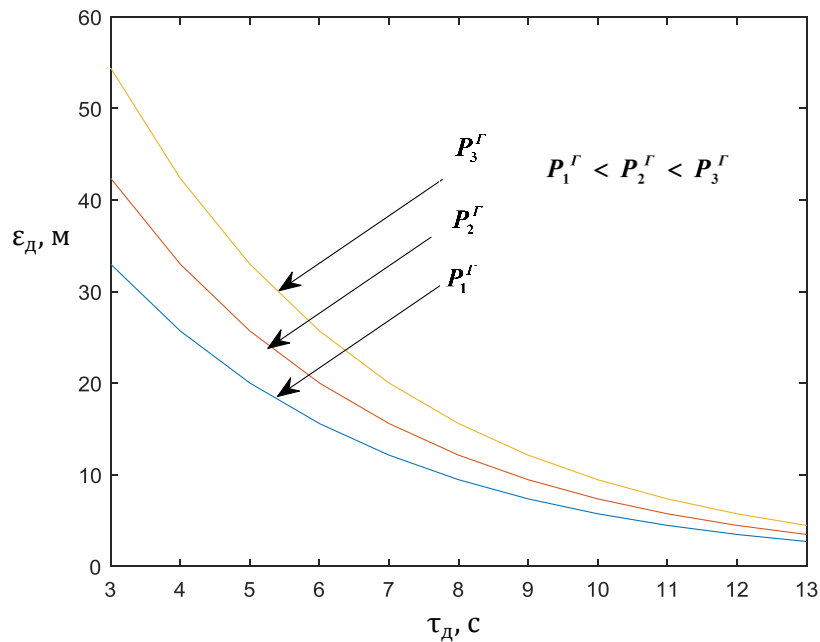


Рисунок 1 – Графики семейства кривых уровня вероятности выполнения задачи оценивания координат объекта

Процесс анализа может быть проиллюстрирован следующим примером. Пусть законы распределения случайных величин $\hat{\tau}_0$ и $\hat{\tau}_1$ имеют следующие значения параметров $\tau'_0 = 2$; $\tau''_0 = 12$; $\mu = 15$; $\tau'_1 = 1$.

Для иллюстрации работоспособности предлагаемой методики определим значение P_{B3} при $\epsilon_d = 4$ и $\tau_d = 15$, $\alpha = 8$, $\beta = 0,25$, задавшись пороговым значением $P_{B3}^{tr} = 0,8$. В этом случае при выбранных значениях параметров значение вероятности $P_{B3} = 0,8561$ выполнения задачи удовлетворяет критерию (7) пригодности качества рассматриваемого процесса.

При уменьшении значения предельно допустимых затрат времени до $\tau_d = 10$ значение вероятности составит $P_{B3} = 0,3562$, что позволяет сделать вывод о непригодности процесса навигационного обеспечения ЛА.

Задаваясь гарантируемыми значениями показателя качества $P_{вз}^{\Gamma}$ и максимально допустимой погрешности ε_d , можно указать минимально возможное директивное время τ_d определения координат $\pi(x, y, z)$ с заданным качеством.

Компромиссные кривые Парето уровня P^{Γ} могут быть также построены на плоскости $u_1 0 u_2$, где u_1 и u_2 – параметры (например, α и β). Данные графики позволяют наглядно исследовать совместное и совокупное влияние определенных значений параметров, выявить область их допустимых значений и оптимальные значения по максимуму показателя качества.

Выводы

Таким образом, данная методика позволяет оценивать пригодность процесса определения координат ЛА и выявлять область допустимых значений параметров, обеспечивающих решение задачи навигационного обеспечения с качеством не ниже требуемого уровня.

Литература

1 Петухов Г.Б., Якунин В.И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. – М.: АСТ, 2006.

2 Теория автоматического управления / Под ред. А.А. Воронова. – М.: Высшая школа, 1986.