



ОБРОБКА ІНФОРМАЦІЇ В СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.396.98

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО КАЛМАНОВСКОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ ПО СИГНАЛАМ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ

О.И. Вотяков

(Объединенный научно-исследовательский институт ВС Украины, Харьков)

Представлен метод определения угловой ориентации объектов по фазовым измерениям сигналов СРНС с использованием модифицированного калмановского фильтра. При этом в качестве начальных приближений требуемых оценок используются их значения, полученные на основе менее точных, но однозначных кодовых измерений, вектор состояния расширен за счет систематических погрешностей измерений, а для увеличения времени обработки используется контроль «обновляющей» последовательности.

модифицированный калмановский фильтр, угловые координаты, навигационные спутники

Постановка проблемы. В настоящее время для высокоточного определения ориентации объектов широко используются фазовые измерения спутниковых навигационных излучений. Однако, основной проблемой при этом является разрешение неоднозначности фазовых измерений, которые сопутствуют использованию интерферометрического принципа измерений. Один из способов решения этой задачи основан на калмановской фильтрации фазовых измерений [5], в которой в качестве априорных данных используются результаты обработки кодовых измерений, а фильтрация осуществляется с оценкой неинформационных параметров (величин неоднозначностей измерений по каждому спутнику, которые полагаются неизменными за время сеанса измерений). Этому способу присущ один существенный недостаток – с увеличением времени обработки увеличивается вероятность невыполнения условия неизменности неинформационных парамет-

ров, что в конечном итоге приведет к ухудшению точности оценивания.

Анализ последних исследований и публикаций литературы. Известно много публикаций, посвященных применению фильтра Калмана для решения задач угловой ориентации, большая часть которых основана на комплексном использовании информации инерциальных систем навигации и средств спутниковой навигации. Практический интерес представляет рассмотренная в [4, 5] возможность использования в качестве априорных данных кодовых измерений без привлечения информации инерциальных систем, что существенно сокращает стоимость измерительного комплекса.

Целью настоящей статьи является разработка алгоритма калмановской фильтрации первых разностей фазовых измерений по сигналам спутниковых навигационных систем, позволяющего оценить параметры угловой ориентации объектов на длительных интервалах времени.

Изложение основного материала. Для оценки углового положения используем измерения, задаваемые при помощи уравнений [4]:

$$\hat{q}_j = \psi_{xj}X + \psi_{yj}Y + \psi_{zj}Z - \xi_j + \delta q_j, \quad (1)$$

где \hat{q}_j – нормированная величина оценки измеренного значения разности фаз сигнала j -го спутника, принятого на первую и вторую антенны интерферометрического комплекса; $\psi_{xj} = (\tilde{X}_j - x)/R_j$, $\psi_{yj} = (\tilde{Y}_j - y)/R_j$ и $\psi_{zj} = (\tilde{Z}_j - z)/R_j$ – направляющие косинусы вектора, совпадающего по направлению с направлением на спутник; $(\tilde{X}_j, \tilde{Y}_j, \tilde{Z}_j)$ – известные координаты j -го спутника в Гринвичской геоцентрической системе координат; (x, y, z) – координаты объекта; ξ_j – неизвестная систематическая погрешность измерений относительно j -го спутника, которая включает неоднозначность и собственно систематическую погрешность; δq_j – флуктуационная погрешность измерений (аппаратная шумовая и др.).

Оцениваемыми параметрами являются информационные (X, Y, Z) и неинформационные $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_j)$, которые образуют вектор состояния объекта S . Модель изменения вектора состояния во времени (для простоты рассмотрим случай неподвижных объектов) имеет вид

$$S_{k+1} = S_k + G_k J_k, \quad (2)$$

где S_{k+1} и S_k – вектор состояния объекта в $k+1$ и k момент времени соответственно, причем: $\dim S_k (S_{k=1}) = (n+1)$; J_k – вектор случайных возмущений оцениваемых параметров, называемый шумом состояний; G_k – матрица коэффициентов усиления шума состояний.

Уравнения вида (1) можно записать в векторно-матричном виде:

$$\underline{Q}_k = \underline{\Psi}_k S_k + \delta \underline{Q}_k, \quad (3)$$

где $\underline{Q}_k = \|\| q_{1k}, q_{2k}, \dots, q_{jk} \|\|^T$ – вектор измерений разностей фаз, полученный в k -й момент времени; $\delta\underline{Q}_k$ – вектор погрешностей измерений, распределенных по нормальному закону с нулевым средним и корреляционной матрицей $\underline{K}_{\delta Q}$; $\underline{\Psi}_k$ – матрица преобразования вектора состояния объекта \underline{S}_k в \underline{Q}_k – вектор измеренных значений, причем, так как уравнения (3) являются линейными, то данная матрица является матрицей коэффициентов:

$$\underline{\Psi}_k = \begin{pmatrix} \Psi_{x1k} & \Psi_{y1k} & \Psi_{z1k} & -1 & 0 & \dots & 0 \\ \Psi_{x2k} & \Psi_{y2k} & \Psi_{z2k} & 0 & -1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Psi_{xnk} & \Psi_{ynk} & \Psi_{znk} & 0 & 0 & \dots & -1 \end{pmatrix}, \quad \dim \underline{\Psi}_k = n \times (n+3). \quad (4)$$

Вычисление начальных значений вектора состояния \underline{S}_0 и корреляционной матрицы \underline{K}_0 , характеризующей точность его определения, выполняется путем определения относительных (по отношению к первой антенне) координат второй антенны комплекса, вычисления азимута и угла места и их точностных характеристик с последующим пересчетом в геоцентрические координаты. Использование относительных координат позволяет практически полностью исключить влияние ионосферных, тропосферных и эфемеридных систематических составляющих погрешностей кодовых измерений.

После получения вектора начального состояния объекта \underline{S}_0 и его корреляционной матрицы \underline{K}_0 осуществляется фильтрация результатов измерений по алгоритму Калмана при помощи следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \underline{K}_{k+1} &= \underline{K}_k + \underline{G} \cdot \underline{K}_J \cdot \underline{G}^T; \\ \underline{P}_{k+1} &= \underline{K}_{k+1} \cdot \underline{\Psi}_k^T \cdot (\underline{\Psi}_k \cdot \underline{K}_{k+1} \cdot \underline{\Psi}_k^T + \underline{K}_{\delta Q})^{-1}, \quad \dim \underline{P}_{k+1} = (n+3) \times n; \\ \underline{S}_k &= \underline{S}_{k-1} + \underline{P}_k \cdot [\underline{Q}_k - \underline{\Psi}_k \underline{S}_{k-1}]; \quad \underline{K}_k = (1 - \underline{P}_k \cdot \underline{\Psi}_k) \cdot \underline{K}_{k-1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Полученные значения вектора состояния объекта \underline{S}_k после прекращения измерений или после принудительной остановки процесса могут быть пересчитаны в значения азимута и угла места. Однако особенностью решаемой задачи определения параметров угловой ориентации неподвижных объектов является возможность наличия целочисленного скачка или перескока в первых разностях фазовых измерений. Это обусловлено движением спутников и с течением времени вероятность возникновения скачка возрастает. Поэтому обнаружение наличия скачка (или целочисленного перескока) фазы имеет принципиальное значение в задачах калмановской фильтрации на длительных интервалах времени.

Под модифицированным фильтром Калмана обычно понимается фильтр, в котором осуществляется оценка дополнительных параметров [5]. В нашем случае такими параметрами могут быть последовательности невязок между измеренными и экстраполированными параметрами процесса.

При таком подходе из (1) – (5) может быть получена обновляющая последовательность для измерений каждого из спутников:

$$v_k^j = \hat{Q}_k^j - (\psi_{Xk}^j X_k + \psi_{Yk}^j Y_k + \psi_{Zk}^j Z_k - \xi_k^j)_{\text{экстр}}, \quad (6)$$

которая в установившемся режиме (при отсутствии скачка) представляет собой гауссовскую случайную последовательность с нулевым средним значением и дисперсией

$$\sigma_{v_k^j}^2 = (\bar{\Psi}_k^j \underline{K}_{\text{экстр}} (\bar{\Psi}_k^j)^T + \sigma_Q^2). \quad (7)$$

Это свидетельствует о том, что обнаружение целочисленного скачка в первых разностях фазовых измерений может быть основано на принципе контроля в реальном времени обновляющей последовательности. Естественно, в качестве решающей статистики может быть использована не сама последовательность, а некоторая функция этой последовательности.

На практике [5] часто используется параметрический алгоритм обнаружения, в котором в качестве входного сигнала используется значение квадратичной формы на выходе фильтра, определяемое выражением:

$$h_k = v_k^2 / \sigma_{v_k}^2. \quad (8)$$

Для определения характеристик качества обнаружения скачка в значении неоднозначности фазовых измерений рассматриваемым методом необходимо знать плотность распределения вероятности величины h_k при отсутствии и наличии скачка. В рассматриваемом случае v_k – случайная величина, характеризующаяся нормальным законом распределения с математическим ожиданием Δv при наличии скачка и 0 – при отсутствии ($\Delta v = 360^\circ = 2\pi$ – фиксированное целочисленное смещение при наличии «скачка» в разностях фазовых измерений). Тогда при $M[v_k] = 0$ плотность распределения вероятностей h_k соответствует центральному χ^2 -распределению и записывается как

$$\chi^2(h_k) = \frac{1}{\sqrt{2}\Gamma(1/2)} (h_k)^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{h_k}{2}\right), \quad (9)$$

где $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функция.

Если же $M[v_k] \neq 0$, то h_k подчинена нецентральному χ^2 -распределению с параметром нецентральности

$$\alpha_k = \Delta v^2 / \sigma_v^2,$$

а плотность распределения вероятностей имеет вид

$$\chi^2(h_k, \alpha_k) = \exp\left[-\left(\frac{\alpha_k}{2} + \frac{h_k}{2}\right)\right] \sum_{j=0}^{\infty} \left[\frac{1}{j} \left(\frac{\alpha_k}{2}\right)^j \frac{h_k^{j-1/2}}{2^{2j-1/2} \Gamma(j+1/2)} \right]. \quad (10)$$

Выражения (9) и (10) являются исходными для расчета вероятностных характеристик алгоритма обнаружения скачка в значении фазовой неодно-

значности рассматриваемым способом. В частности, если скачок значения неоднозначности обнаруживается по превышению квадратичной формой порога S_0 , то вероятность ложного обнаружения скачка будет равна:

$$P_F = \int_{S_0}^{\infty} \chi^2(h_k, 0) d\hat{S}_k, \quad (11)$$

а вероятность правильного обнаружения скачка

$$P_D = \int_{S_0}^{\infty} \chi^2(h_k, \alpha_k) d\hat{S}_k. \quad (12)$$

Значение параметра α_k в начале интервала измерения определяется дисперсиями оценок требуемых параметров σ_v^2 , полученных на основе кодовых измерений. С течением времени за счет фильтрации значения σ_v^2 будут уменьшаться, что приведет к увеличению параметра α_k . Приближенные расчеты показывают, что кодовые измерения обеспечат среднеквадратическую погрешность определения азимута и угла места на уровне $5 \dots 10^\circ$, что приведет к значениям параметра $\alpha_k = 600 \dots 800$. Такие значения параметра нецентральности позволят обнаружить процесс скачка в неоднозначности уже на первом шаге процесса фильтрации.

Выводы. Предложенная модификация фильтрации измерений первых разностей фаз позволяет обнаружить возможные скачки целочисленного значения неоднозначностей фазовых измерений, учесть их при дальнейшей обработке и тем самым избежать ухудшения точности угловых определений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Глобальна система визначення місцеположення (GPS): Теорія і практика / Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтенеггер та інші. – К.: Наук. думка, 1995. – 380 с.*
2. *Giulicchi L., Boccia L., Di Massa G., Amendola G. Performance Improvement for GPS-Based Attitude Determination Systems // Proc. of ION GPS'2000. – Salt Lake City, USA. – 19-22 September 2000. – P. 2209 – 2215.*
3. *Генике А.А., Побединский Г.Г. Глобальная спутниковая система определения местоположения GPS и ее применения в геодезии. – М.: Геоиздат, 1999. – 264 с.*
4. *Флерко С.Н., Вотяков О.И. Метод определения угловых координат с разрешением неоднозначности первых разностей фазовых GPS-измерений // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2003. – Вып. 3. – С. 186 – 190.*
5. *Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. – К.: КВЦ. – 2000 – 428 с.*

Поступила 31.10.2005

Рецензент: доктор технических наук, профессор В.П. Деденок,
Объединенный научно-исследовательский институт ВС, Харьков.