

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ СОПРОВОЖДЕНИЯ МАНЕВРИРУЮЩИХ ЦЕЛЕЙ

д.т.н., проф. В.Д. Карлов, к.т.н. Р.Э. Пашенко, С.В. Яровой,
Н.Н. Петрушенко, А.В. Челпанов, О.Я. Луковский

Рассматривается алгоритм сопровождения маневрирующих целей, который обеспечивает непараметрическое обнаружение маневра цели и оценку его интенсивности. При обнаружении маневра осуществляется переключение на фильтр Калмана более высокого порядка, сглаживание в котором производится с учетом характеристик маневра.

В процессе сопровождения целей необходимо использовать оптимальные алгоритмы фильтрации, которые обеспечивают максимальную помехоустойчивость режима сопровождения. При этом, как правило, принимается детерминированная модель траектории цели.

В реальных условиях уравнение модели траектории может не соответствовать истинному движению цели, в первую очередь из-за ее маневра.

Учет возможности маневра сопровождаемой цели приводит к необходимости расширения эффективной полосы пропускания фильтра и, следовательно, к ухудшению точностных характеристик при оценках параметров траектории неманеврирующих целей.

Устойчивость линейных рекуррентных фильтров может быть обеспечена [1]:

- введением дополнительного члена в корреляционную матрицу ошибок экстраполяции;
- введением искусственного старения погрешностей измерения;
- ограничением коэффициента усиления фильтра снизу.

Маневр цели приводит к появлению в некоторый момент времени составляющей ускорения.

При отсутствии маневра оптимальным фильтром является фильтр Калмана второго порядка.

В этом случае ошибка оценки представляет собой белый гауссовский шум с нулевым средним и дисперсией

$$\mathbf{D} = \mathbf{M}\Psi_{\Pi_0}^{-1}\mathbf{M}^T + \mathbf{R}, \quad (1)$$

где Ψ_{Π_0} – корреляционная матрица ошибок экстраполяции; \mathbf{M} – линейный оператор соответствия оцениваемых параметров и измеряемых координат; \mathbf{R} – корреляционная матрица ошибок измерения.

Скачок ускорения, возникающий в момент времени t_m , приводит к появлению составляющей ошибки сопровождения, среднее значение которой будет изменяться во времени

$$\mathbf{M}[\Delta v] = \mathbf{F}_{(j,m)} \cdot \mathbf{g}, \quad (2)$$

где \mathbf{g} – скачок ускорения; $\mathbf{F}_{(j,m)}$ – переходная матрица возмущений системы.

Достаточно хорошую аппроксимацию величины $\mathbf{F}_{(j,m)}$ можно получить, если ограничиться составляющей ускорения

$$\mathbf{F}_{(j,m)} = \frac{1}{2}(\mathbf{j}-\mathbf{m})^2 \mathbf{T}^2, \quad (3)$$

где \mathbf{m} – момент скачка ускорения; $\mathbf{j} + 1 > \mathbf{m}$; \mathbf{T} – период обновления информации.

Тогда значение возмущающегося параметра, в данном случае – ошибки экстраполяции на \mathbf{j} -м шаге, определится как

$$\mathbf{z}_{(j,m)} = \mathbf{F}_{(j,m)} \cdot \mathbf{g} = \frac{\mathbf{g}}{2}(\mathbf{j}-\mathbf{m})^2 \mathbf{T}^2, \quad (4)$$

где $\mathbf{j} \geq \mathbf{m}$.

Алгоритм сглаживания параметров траектории маневрирующей цели должен включать следующие составляющие [1]:

- алгоритм сглаживания параметров на участке детерминированного движения;
- алгоритм обнаружения маневра и оценки его характеристик;
- алгоритм сглаживания параметров на участке обнаруженного маневра с учетом характеристик маневра (времени появления и интенсивности).

Для сглаживания параметров детерминированной траектории используется фильтр Калмана второго порядка, а при обнаружении маневра производится переключение на фильтр более высокого порядка с учетом характеристик маневра цели.

Обнаружение маневра цели может быть произведено по величине параметра, который изменяется достаточно интенсивно при скачке ускорения.

Учитывая статистические характеристики ошибок при сопровождении цели, в качестве такого параметра при обнаружении маневра целесообразно взять квадратичную форму динамических ошибок сопровождения, которые представлены в виде [1]:

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{U}_i - \hat{\mathbf{U}}_{iB})^T \mathbf{P}_i^{-1} (\mathbf{U}_i - \hat{\mathbf{U}}_{iB}), \quad (5)$$

где \mathbf{U}_i , \mathbf{U}_{iB} – соответственно вектор измеренных и экстраполированных

значений координат в момент i -го измерения; \mathbf{P}_i – корреляционная матрица суммарных ошибок измерения и экстраполяции.

Анализ выборочной совокупности наблюдаемых сигналов целесообразно ограничить “скользящим окном” в пределах \mathbf{M} выборок.

Закон распределения квадратичной формы \mathbf{Q}_i при отсутствии маневра подчиняется центральному χ^2 -распределению с \mathbf{M} степенями свободы, при этом среднее значение “невязки” $\Delta\mathbf{U} = \mathbf{U}_i - \mathbf{U}_B$ будет равно нулю, т.е.

$$\mathbf{M}[\Delta\mathbf{U}_i] = \mathbf{0}.$$

При наличии маневра значения \mathbf{Q}_i подчиняются нецентральному χ^2 -распределению с параметром нецентральности

$$\alpha_i = \delta\mathbf{U}_i^T \mathbf{P}_i^{-1} \delta\mathbf{U}_i, \quad (6)$$

где $\delta\mathbf{U}_i = \mathbf{M}[\Delta\mathbf{U}_i]$, а величину α_i определяют ошибки измерения, характеристика маневра и другие возмущающие факторы.

При проверке различных гипотез (в данном случае проверяется наличие маневра цели) могут быть использованы как параметрические, так и непараметрические алгоритмы.

Важнейшим свойством непараметрических алгоритмов является постоянство вероятности ложного обнаружения (тревоги) при произвольных законах распределения возмущающих параметров.

В данном случае могут быть использованы знаковые или ранговые алгоритмы обнаружения маневра.

Ранговые тесты проверки статистических гипотез являются более “мощными” по сравнению со знаковыми, так как учитывают степень отклонения элементов исследуемой выборки от некоторого уровня или элементов опорной выборки.

Одним из достоинств ранговых статистик является их инвариантность относительно монотонных нелинейных преобразований, так как любое преобразование указанного типа не нарушает соотношения между отсчетами (порядок расположения отсчетов в вариационном ряду), а, значит, их ранги.

Анализ выборочной совокупности $j = 1, 2, \dots, \mathbf{M}$ значений квадратичной формы \mathbf{Q}_i производится в “скользящем окне” размером \mathbf{M} путем сравнения данной выборки с отсчетами опорной выборки того же размера, полученной на этапе сопровождения детерминированной траектории (например с отсчетами предыдущей выборки для $\mathbf{k} = j - \mathbf{M}$).

В процессе обработки вычисляются вначале ранги r_i отсчетов \mathbf{Q}_i , а затем ранговые статистики.

Учитывая характер изменения \mathbf{Q}_i при маневре цели, который приводит к регрессии (или тренду) значений анализируемых параметров,

для обнаружения маневра целесообразно использовать тесты ранговой корреляции, например, тест ранговой корреляции Спирмена:

$$S(r) = \sum_{i=1}^M ir_i. \quad (7)$$

Далее полученное значение статистики $S(r)$ сравнивается с порогом и принимается решение о наличии маневра цели

$$S(r) \geq S_{\text{пор}}.$$

При технической реализации обнаружителя может быть использована схема многоканального рангового обнаружителя, предложенная в [2].

В качестве анализируемых выборок, кроме квадратичных форм Q_i , могут быть использованы выборки значений рассогласования между экстраполированными и измеренными значениями координат цели ΔU_i или между экстраполированными значениями и оценками.

После обнаружения маневра цели необходимо оценить его характеристики, в частности, интенсивность маневра.

Для этого можно воспользоваться выборкой значений “невязки” $Z(j,m)$ (4), полученных за интервал времени, на котором произошло обнаружение маневра.

Закон изменения величины $Z(j,m)$ будет зависеть от интенсивности маневра g и времени начала маневра m .

По критерию максимального правдоподобия оценка неизвестного значения \hat{g} может быть определена следующим образом:

$$\hat{g} = P_{g(M,m)} \cdot Z_{j(M,m)}, \quad (8)$$

где

$$P_{g(M,m)} = \sum_{j=1}^M F_{(j,m)}^T P_z^{-1}(j) F_{(j,m)};$$

$$Z_{(M,m)} = \sum_{j=1}^M F_{(j,m)}^T P_z^{-1}(j) Z_{(j,m)};$$

$P_z(j)$ – корреляционная матрица ошибок за счет маневра цели; m – момент начала маневра (здесь принимается соответствующим началом выборки, по которой произошло обнаружение цели, т.е. $m = 1$); M – размер “скользящего окна”.

Тогда оценка интенсивности маневра может быть записана, как

$$\hat{\mathbf{g}} = \frac{\mathbf{Z}_{(\mathbf{M}, \mathbf{m})}}{\mathbf{P}_{\mathbf{g}(\mathbf{M}, \mathbf{m})}} = \frac{\sum_{j=1}^{\mathbf{M}} \mathbf{F}_{(j)} \mathbf{Z}_j}{\sum_{j=1}^{\mathbf{M}} \mathbf{F}_{(j)}^2}, \quad (9)$$

где $\mathbf{F}_{(j)}$ определяется в соответствии с (3), а $\mathbf{P}_{\mathbf{g}(\mathbf{M}, \mathbf{m})}$ имеет смысл энергии сигнала.

Если необходимо уточнить момент начала маневра цели \mathbf{m} , проводится расчет оценок $\hat{\mathbf{g}}(\mathbf{m})$ в соответствии с (9) для различных значений \mathbf{m} ($\mathbf{m} = \mathbf{j}-1, \mathbf{j}-2, \dots, \mathbf{j}-\mathbf{k}$) относительно начала выборки $\mathbf{j} = 1, 2, \dots, \mathbf{M}$.

Далее выбирается максимальное значение оценки

$$\mathbf{g}_{\text{макс}} = \max_{\mathbf{m}} \{ \mathbf{g}(\mathbf{m}) \}.$$

Время, соответствующее \mathbf{m} , для которого получено $\mathbf{g}_{\text{макс}}$, принимается за начало маневра.

После обнаружения и определения характеристик маневра производится переключение на фильтр более высокого порядка, а при сглаживании параметров учитываются характеристики маневра.

Так, непараметрическое обнаружение манёвра цели и учёт его интенсивности вместе с использованием фильтра Калмана третьего порядка обеспечивает уменьшение динамических ошибок фильтрации не менее чем в 3 раза, а также повышает устойчивость сопровождения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Сов. радио, 1974. – С. 364 – 379.
2. Обнаружение радиосигналов / Под ред. А.А. Колосова. – М.: Радио и связь, 1989. – 165 с.
3. Гришин Ю.П., Казаринов Ю.М. Динамические системы, устойчивые к отказам. – М.: Радио и связь, 1985. – 163 с.

Поступила 17.07.2002

КАРЛОВ Владимир Дмитриевич, доктор техн. наук, профессор, нач. кафедры Харьковского военного университета. Окончил ВИРТА в 1968 году. Область научных интересов – радиолокация и радионавигация.

ПАЩЕНКО Руслан Эдуардович, канд. техн. наук, доцент, преп. кафедры Харьковского военного университета. Область научных интересов – радиолокация и радионавигация.

ЯРОВОЙ Сергей Владимирович, инженер учебной лаборатории кафедры Харьковского военного университета. Область научных интересов – радиолокация и радионавигация.

ПЕТРУШЕНКО Николай Николаевич, командир дивизии, г. Севастополь. Область научных интересов – радиолокация и радионавигация.

ЛУКОВСКИЙ Олег Ярославович, адъюнкт очной адъюнктуры при Харьковском военном университете. Область научных интересов – радиолокация и радионавигация.

ЧЕЛПАНОВ Артём Владимирович, курсант Харьковского военного университета.