

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИИ МАНЕВРИРУЮЩЕЙ ЦЕЛИ

В.Д. Карлов¹, В.И. Франков¹, О.Я. Луковский¹, К.П. Квиткин¹,
В.В. Гаврилкин², А.В. Челпанов¹
(¹Харьковский университет Воздушных сил, ²в/ч А2293)

Рассматривается возможность повышения эффективности сопровождения целей адаптивной коррекции значений корреляционной матрицы ошибок (КМО) измерений, а также оценок параметров траектории маневрирующей цели. Для коррекции используются результаты анализа текущих динамических ошибок фильтрации.

маневрирующая цель, адаптивная коррекция, корреляционная матрица ошибок, динамические ошибки фильтрации

Постановка проблемы. При сопровождении целей, для определения параметров их траектории движения, как правило, принимается одно из следующих допущений: 1) траектория цели на интервале наблюдения полагается детерминированной, и может быть описана системой дифференциальных уравнений с известными правыми частями; 2) траектория аппроксимируется с помощью степенных полиномов, постоянные коэффициенты которых (параметры траектории) подлежат определению.

Кроме того, обычно принимается, что статистические характеристики погрешностей измерений достаточно хорошо известны (вид закона распределения и его параметры – среднее, корреляционная матрица ошибок).

Однако, в реальных условиях часто имеет место априорная неопределенность при вторичной обработке радиолокационной информации, в частности при сопровождении сложной цели, статистические характеристики погрешностей измерений могут изменяться. Кроме того, изменяются коэффициенты аппроксимирующего полинома траектории при совершении целью маневра. Указанные факторы снижают точность оценки параметров траектории и могут привести к срыву цели с сопровождения.

В связи с этим возникает необходимость алгоритмической адаптации процесса вторичной обработки радиолокационной информации.

Целью статьи является возможность корреляции значений корреляционной матрицы ошибок измерений для повышения точности измерения параметров траектории маневрирующей цели.

Для достижения заданной цели предлагается использовать результаты анализа текущих ошибок фильтрации, на основе которых прово-

дится коррекция оценок параметров траектории сопровождаемой цели и корреляционной матрицы ошибок (КМО). Уравнения состояния и наблюдения объекта соответственно могут быть записаны:

$$x_{(i)} = F \cdot x_{(i-1)} + \Gamma \cdot w_{(i-1)}; \quad (1)$$

$$y_{(i)} = H \cdot x_{(i)} + v_{(i)}, \quad (2)$$

где F – матричный оператор экстраполяции; $x_{(i)}$ – вектор параметров траектории на момент времени $t_{(i)}$; H – матрица соответствия между значениями измеряемого и оцениваемого параметра; $y_{(i)}$ – измеренные значения вектора параметров в момент времени $t_{(i)}$; Γ – переходная матрица возмущений; $w_{(i-1)}$ – возмущающее воздействие, определяемое, например, интенсивностью маневра; $v_{(i)}$ – случайная составляющая погрешности измерений.

Рассмотрим возможность использования текущих ошибок фильтрации для последовательной оценки погрешностей измерений, входящих в уравнения наблюдения (1), и параметров возмущений (например, за счет маневра цели), входящих в уравнение состояния наблюдаемого объекта (сопровожаемой цели) (2). В общем случае для оценок вектора измеряемых параметров траектории на i -м шаге (цикле) сопровождения цели в соответствии с уравнениями фильтра Калмана можно записать [1]:

$$\hat{x}_{(i)} = x_{(i/(i-1))} + K_{(i)} \cdot Z_{(i)}, \quad (3)$$

где $x_{(i/(i-1))} = F \cdot \hat{x}_{(i-1)}$; $Z_{(i)}$ – значение невязки; $Z_{(i)} = y_{(i)} - Hx_{(i/(i-1))}$; $K_{(i)}$ – коэффициент усиления фильтра на i -м шаге; $x_{(i/(i-1))} = x_{ei}$ – экстраполированное значение параметра.

Величина коэффициента усиления фильтра $K_{(i)}$ определяется точностью единичных измерений (характеризуется КМО измерений $R_{(i)}$), точностью получаемых оценок параметров по результатам предыдущих i измерений (характеризуется КМО оценки параметров $\Psi_{(i)}$) экстраполяции параметров (КМО экстраполяции $\Psi_{e(i)}$) [1]:

$$K_{(i)} = \Psi_{e(i)} \cdot H^T \cdot R_{(i)}^{-1}, \quad (4)$$

где $\Psi_{(i)} = \Psi_{e(i)} - \Psi_{e(i)} \cdot H^T (H \Psi_{e(i)} H^T + R_{(i)})^{-1} \cdot H \Psi_{e(i)}$; $\Psi_{(i)} = \phi \cdot \Psi_{e(i)} \cdot \phi^T$; ϕ – матричный оператор пересчета КМО экстраполяции, который, как правило совпадает с оператором F .

Можно полагать, что погрешности измерений распределены по многомерному гауссовскому закону с нулевым средним значением и диагональной матрицей погрешностей измерений Ψ_v . При этом ошибки фильтрации (значения невязки Z) также распределены по гауссовскому закону с нулевым средним и дисперсией $\delta_Z^2 = 1.5\delta_y^2$ [2].

В начале рассмотрим возможность оценки и учета ошибок измерения для адаптации процесса калмановской фильтрации.

Возможное изменение дисперсии ошибок измерения будет определять изменение значений невязки Z , в частности, ее составляющей:

$$Z_{1(i)} = y_{(i)} - \hat{y}_{(i)}, \quad (5)$$

где $y_{(i)}$ – измеренные значения; $\hat{y}_{(i)}$ – оценки параметров; $\hat{y}_{(i)} = H \cdot \hat{x}_{(i)}$.

Тогда текущее значение дисперсии измерений можно оценить по изменению составляющих невязки Z_1 определить как

$$M_{[Z_1]} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_{1(i)}. \quad (6)$$

Величина $M_{[Z_1]}$ может быть не равна нулю ввиду несоответствия траектории цели ее выбранной модели.

Выборочная несмещенная оценка КМО фильтрации определяется как

$$\Psi_{Z_1} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n [Z_{1(i)} - M_{(Z_1)}] * [Z_{1(i)} - M_{(Z_1)}]^T = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \Psi_{Z_{1(i)}}. \quad (7)$$

Значения $\Psi_{Z_{1(i)}}$ определяются величинами КМО оценки параметров траектории $\Psi_{(i)}$ и КМО измерений $R_{(i)}$:

$$\Psi_{Z_{1(i)}} = \Psi_{(i)} + R_{(i)}. \quad (8)$$

Тогда оценка КМО измерений определяется как результат усреднения:

$$R = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left[\Psi_{Z_{1(i)}} - \frac{N-1}{N} H \Psi_{(i)} H^T \right]. \quad (9)$$

Полученные значения R и $M_{[Z_1]}$ используются для коррекции текущих оценок параметров траектории в уравнениях калмановской фильтрации (3), (4).

Далее рассмотрим возможности обнаружения и оценки характеристик маневра цели по значениям текущих ошибок фильтрации для адаптивной коррекции алгоритма сопровождения.

При наличии маневра цели появляется составляющая возмущений $M_{(i)}$ в уравнении состояния объекта (1), величина которой определяется интенсивностью маневра.

Полагаем, что значение интенсивности маневра g , описывается средним значением интенсивности маневра \bar{g} и корреляционной матрицей оценки параметров маневра Ψ_g .

Маневр цели приводит к увеличению текущих ошибок фильтрации, в частности, составляющих невязки (6):

$$Z_{2(i)} = \hat{x}_{(i)} - x_{i/(i-1)}, \quad (10)$$

где $Z_{2(i)}$ – значение невязки при маневре цели; $\hat{x}_{(i)}$ – текущая оценка параметра траектории; $x_{(i/(i-1))} = x_{e(i)}$ – экстраполированное значение параметра.

Обнаружение и оценку характеристик маневра можно осуществить по выборке значений невязки $Z_{2(i)}$ в пределах ”скользящего окна” размером N .

При этом предполагается, что ошибки измерения распределены по нормальному закону с нулевым средним и КМО измерений R , т.е. среднее значение составляющей невязки за счет ошибок измерения равно нулю.

Выборочное среднее значение невязки $Z2_{(i)}$ определяется как

$$M_{[Z2]} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z2_{(i)}. \quad (11)$$

Для обнаружения маневра цели полученное значение сравнивается с порогом:

$$M_{[Z2]} \geq Z_{\text{пор}}$$

Величина порога обнаружения выбирается исходя из заданных значений вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги.

При этом необходимо учесть, что значения невязки подчиняются нецентральному χ^2 -распределению с $\ell \cdot N$ степенями свободы, где ℓ – размерность вектора измерений, N – размер выборки [1]. Кроме того, учитывается задержка в обнаружении маневра за счет времени накопления и усреднения значений невязок.

Несмещенная оценка КМО фильтрации может быть представлена следующим образом:

$$\Psi_{Z2} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [Z2_{(i)} - M_{[Z2]}] * [Z2_{(i)} - M_{[Z2]}]^T = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \Psi_{Z2(i)}. \quad (12)$$

Корреляционная матрица ошибок фильтрации определяется ошибками экстраполяции $\Psi_{e(i)}$, ошибками оценки параметров траектории $\Psi_{(i)}$ и КМО возмущений за счет маневра Ψ_w :

$$\Psi_{Z2(i)} = \Psi_{(i)} + \Psi_{e(i)} + \Psi_{w(i)}. \quad (13)$$

Тогда в результате усреднения получаем:

$$\Psi_w = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left[\Psi_{Z2(i)} - \frac{N-1}{N} \Phi \Psi_{(i-1)} \Phi^T - \Psi_{(i)} \right]. \quad (14)$$

Полученные значения параметров $M_{[Z2]}$ и Ψ_w используется для коррекции текущих оценок параметров траектории в соответствии с уравнениями для фильтра Калмана (3) и (4).

По среднему значению невязки $M_{[Z2]}$ можно оценить величину интенсивности (ускорения) маневра g .

Составляющая ускорения g определяет ошибку экстраполяции Δx_e и, соответственно, составляющую невязки $Z2$, следовательно, для средних значений, можно записать:

$$M_{[Z2]} = -M[\Delta x_e]. \quad (15)$$

Для линейного фильтра справедливо соотношение [2]:

$$\Delta x_{eN} = \frac{1}{12} T_N^2 g, \quad (16)$$

где N – размер выборки; t_N – время первого измерения интервала выборки; T_N – время сопровождения; $T_N = t_N - t_1 = (N-1)\tau_c$; t_1 – время измерения N -го измерения выборки; τ_c – интервал поступления измерений.

Из (15) и (16) в результате усреднения на интервале T_N можно получить [2]:

$$M_N[Z_2] = -\varphi(A, N) \cdot \frac{T_N^2 g}{12}, \quad (17)$$

где A – коэффициент, используемый при усреднении невязок, $0 < A < 1$;

$$\varphi(A, N) \cong \frac{(AN-1)^2 + 1 - 2(1-A)^N}{A^2 N^2}. \quad (18)$$

Среднее значение N невязки:

$$M_N[Z_2] = (1-A)M_{N-1}[Z_2] + A \cdot Z_{2N}. \quad (19)$$

В случае (11) значение $A = 1/N$, тогда

$$\varphi(N) \cong 1 - 2\left(\frac{N-1}{N}\right)^N. \quad (20)$$

Из (11), (17) и (20) получим оценку ускорения маневра:

$$\hat{g} = -(12M[Z_2]) / (\varphi(N)T_N^2). \quad (21)$$

Далее осуществляется коррекция текущих оценок параметров сопровождаемой траектории ускорения \ddot{x}_{TP} и экстраполированных значений координаты x_e и ее производной \dot{x}_e :

$$\ddot{x}_{TPN} = \ddot{x}_{TP} - g; \quad x_{eN} = x_e + \frac{1}{12} T_N^2 g; \quad \dot{x}_{eN} = \dot{x}_e - \frac{1}{12} T_N g.$$

Выводы: Таким образом, полученные результаты анализа текущих динамических ошибок фильтрации, позволяют скорректировать значения корреляционной матрицы ошибок изменений, производимых для оценки интенсивности маневра сопровождаемой цели и получения точных оценок параметров траектории цели при обнаружении ее маневра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. – К.: КВИЦ, 2000. – 255 с.
2. Саврасов Ю.С. Алгоритмы и программы в радиолокации. – М.: Радио и связь, 1985. – 216 с.

Поступила 31.01.2005

Рецензент: доктор технических наук, профессор Я.Д. Ширман,
Харьковский университет Воздушных Сил.