

УДК 621.396.96

В.И. Кошелев, В.А. Белокуров**СОПРОВОЖДЕНИЕ МАНЕВРИРУЮЩЕЙ ЦЕЛИ НА ФОНЕ ПОМЕХ**

Рассмотрена возможность применения S-модифицированного фильтра Калмана при сопровождении цели на фоне помех алгоритмом многогипотезного сопровождения (МНТ) с целью уменьшения числа вычислительных операций, затрачиваемых на реализацию.

Ключевые слова: сопровождение на фоне помех, S-модифицированный фильтр Калмана.

Введение. Задача сопровождения является актуальной для радиолокационных, инфракрасных и оптических систем, таких как системы слежения за спутниками. При этом возможна ситуация, при которой среди отметок, представляющих интерес, находятся отметки, возникающие как за счёт помех искусственного, так и естественного происхождения.

В настоящее время известны следующие алгоритмы сопровождения целей на фоне помех:

- 1) фильтры «ближайшего соседа» и «сильнейшего соседа» [1];
- 2) фильтр вероятностной ассоциации данных [2];
- 3) фильтр многогипотезного сопровождения [2];
- 4) фильтр вероятностного многогипотезного сопровождения [3];
- 5) фильтр ассоциации данных в «скользящем окне» [2].

Общим для данных алгоритмов является использование многомодельных фильтров сопровождения, оценивающих временные, частотные, пространственные координаты маневрирующей цели.

Среди перечисленных алгоритмов одним из наиболее эффективных является фильтр многогипотезного сопровождения [2].

Цель работы. Исследовать возможность применения S-модифицированного фильтра Калмана для оценки параметров траектории в алгоритме многогипотезного сопровождения с учётом возможности оценки радиального ускорения на этапе первичной обработки с целью сокращения числа вычислительных операций, затрачиваемых на реализацию алгоритма многогипотезного сопровождения.

Алгоритм многогипотезного сопровождения. В данном алгоритме относительно каждой новой отметки, попавшей в строб сопровождения траектории, выдвигается три гипотезы:

- 1) новая траектория;
- 2) ложная отметка;
- 3) продолжение одной из старых траекторий.

Структурная схема алгоритма многогипотезного сопровождения, состоящего:

- 1) из блока «Стробирование»;
 - 2) блока «Формирование новых траекторий и гипотез»;
 - 3) блока «Эволюция/удаление гипотез»;
 - 4) блока «Экстраполяция траекторий»;
- представлена на рисунке 1.

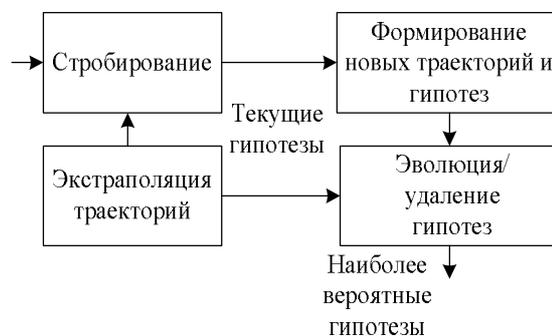


Рисунок 1 – Структурная схема алгоритма многогипотезного сопровождения

В блоке «Стробирование» выполняется операция временного, частотного, пространственного стробирования отметок [2]. С целью уменьшения числа возможных гипотезных траекторий они могут быть продолжены только по отметкам, которые попали в их строб сопровождения.

В блоке «Формирование новых траекторий и гипотез» выполняется формирование гипотезных траекторий и при превышении порога обнаружения траектории формируется новая траектория из гипотезной.

В блоке «Эволюция/удаление гипотез» выполняется фильтрация параметров траекторий как захваченных, так и захватываемых на сопровождение. Кроме того, выполняются операции усечения и комбинирования гипотез,

суть которых заключается в том, что если две гипотезные траектории получали одни и те же отметки в течение долгого времени, то считается, что это одна траектория.

Общее число гипотез на k -м шаге:

$$N_g^k = \sum_{N_{dt}=0}^{\min(M_k, N_{igt})} \binom{M_k}{N_{dt}} \binom{N_{igt}}{N_{dt}} N_{dt}! 2^{M_k - N_{dt}},$$

где M_k – число отметок, поступивших на k -м шаге; N_{igt} – число «старых» траекторий, то есть подтверждённых траекторий; N_{dt} – число «новых» траекторий. Рост числа гипотез носит экспоненциальный характер, в частности при $M_k=5$, число гипотез составляет: $N_{igt} = 2 - N_g^k = 352$, $N_{igt} = 3 - N_g^k = 992$, $N_{igt} = 4 - N_g^k = 2512$.

По каждой гипотезной траектории вычисляется в «скользящем окне» рекуррентно функция правдоподобия:

$$L(k) = L(k-1) + \Delta L(k),$$

где $\Delta L(k) = \ln(1-D)$ – в случае если гипотезная траектория не обновляется на данном сканировании; $\Delta L(k) = (\mathbf{z}(k) - \mathbf{x}(k|k-1))^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{z}(k) - \mathbf{x}(k|k-1))$ – в случае если гипотезная траектория обновляется в данном обзоре; D – вероятность правильного обнаружения отметки; \mathbf{z} – вектор параметров отметки; $\mathbf{x}(k|k-1)$ – вектор экстраполированных значений траектории; \mathbf{R} – ковариационная матрица ошибок измерений. Траектория считается обнаруженной, если $L(k) > th$, где th – порог обнаружения траектории. Длина «скользящего окна» выбирается из компромиссных соображений [5]. При увеличении длины «окна» возрастает вычислительная нагрузка при реализации алгоритма, но при этом уменьшается вероятность захвата на сопровождение ложной траектории. На практике величину «окна» выбирают равной 2...7 обзорам [2].

Для сопровождения маневрирующей цели на фоне помех применяют несколько подходов [2]:

а) ввод дополнительной гипотезы о том, что цель маневрирует;

б) использование многомодельных фильтров для фильтрации параметров траекторий, в частности, многомодельных фильтров Калмана.

В многомодельном фильтре [6] реализуется параллельная работа M фильтров, каждый из которых настроен на определённое значение ускорения [1]:

$$\mathbf{x} = [V; a], \quad \sigma_i^a = \frac{a_{\max} - a_{\min}}{M} i,$$

где a_{\max}, a_{\min} – максимальное и минимальное значения ускорений; V – скорость.

Результирующая оценка траектории имеет вид:

$$\hat{\mathbf{x}}(k|k) = \sum_{j=0}^{M-1} \mu_j(k) \hat{\mathbf{x}}^j(k|k),$$

где $\hat{\mathbf{x}}^j(k|k)$ – оценка траектории на выходе j -го парциального фильтра; M – число парциальных фильтров; $\mu_j(k)$ – вероятность модели движения, заложенной в j -й парциальный фильтр, в качестве которого используется фильтр Калмана с настройкой на априорно определённые значения ускорения [1].

Вероятности j -й модели движения $\mu_j(k)$:

$$\mu_j(k) = \frac{\lambda_j(k) \mu_j(k-1)}{\sum_{i=1}^M \lambda_i(k) \mu_i(k-1)},$$

где

$$\lambda_j(k) = \frac{1}{(2\pi)^m \det(\mathbf{R})^{0,5}} \times \exp(-0,5(\mathbf{z}(k) - \mathbf{x}^j(k|k-1))^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{z}(k) - \mathbf{x}^j(k|k-1)));$$

$\mathbf{x}^j(k|k-1)$ – экстраполированное значение оценки на выходе j -го парциального фильтра.

Число вычислительных операций, затрачиваемых на реализацию многомодельного фильтра, пропорционально числу парциальных фильтров сопровождения, входящих в него.

Одним из перспективных алгоритмов устранения расходимости фильтра Калмана является использование S -модификации. Основной особенностью данного алгоритма является включение в выражение для определения элементов матрицы дисперсий экстраполяции \mathbf{D}_e коэффициента S [3]:

$$\mathbf{D}_e(k) = S \cdot \Phi^T(k, k-1) \mathbf{D}(k-1) \Phi(k, k-1) + \mathbf{Q}_x,$$

где $\Phi(k, k-1)$ – фундаментальная матрица; $\mathbf{D}(k)$ – матрица дисперсий фильтрации; \mathbf{Q}_x – шумы состояния системы; коэффициент S :

$$S = \frac{\text{tr}(\Delta \mathbf{z}^T \mathbf{Q} \Delta \mathbf{z} - \mathbf{H}^T \mathbf{Q} \mathbf{H} - \mathbf{R})}{\text{tr}(\mathbf{H}^T \Phi^T(k, k-1) \mathbf{D}(k, k-1) \Phi(k, k-1) \mathbf{H})}, \quad (1)$$

где $\Delta \mathbf{z}$ – вектор невязок; \mathbf{H} – матрица, преобразующая вектор состояния в вектор измерений, который будет увеличивать элементы матрицы \mathbf{D}_e и коэффициенты усиления фильтра, что вызовет усиление невязки и приближение $\hat{\mathbf{x}}(k|k)$ к истинному значению, \mathbf{Q} – квадратная матрица, размерность которой определяется числом измеряемых параметров, в частности, при измерении на этапе первичной обработки даль-

ности до цели, в канале сопровождения по дальности размерность матрицы равна 1.

Следует отметить, что увеличение вычислительных затрат S -модифицированного фильтра Калмана по сравнению с классическим – незначительно. Поэтому по сравнению с много-модельным фильтром выигрыш составит примерно M раз для каждого канала сопровождения.

Рассмотрим эффективность применения S -модифицированного фильтра в алгоритме многогипотезного сопровождения. При этом в алгоритме о происхождении отметки также рассматриваются 3 гипотезы:

- 1) новая траектория;
- 2) ложная отметка;
- 3) продолжение одной из старых траекторий.

Изменения затронут блок «Эволюция/удаление траекторий».

Рассмотрим функционирование S -модифицированного фильтра Калмана:

$$\mathbf{x} = [R; V; a]; \quad \mathbf{H} = [1; 0; 0];$$

$$\mathbf{D}_e(k) = S \cdot \Phi^T(k, k-1) \mathbf{D}(k-1) \Phi(k, k-1) + \mathbf{Q}_x,$$

где R – дальность. Для расчета коэффициента S используем выражение (1) в составе алгоритма многогипотезного сопровождения.

На рисунке 2 представлены оценки скорости цели с параметрами: цель приближается [7] $V_{nach} = 500 \text{ м/с}$, $a_t = 50 \text{ м/с}^2$, $T = 0.5 \text{ с}$. Априорная неопределённость относительно начального ускорения приводит к наличию переходного процесса, который достигает величины порядка 30 тактов (сплошная линия). Одним из возможных путей решения данной проблемы является оценка радиального ускорения цели на этапе первичной обработки радиолокационной информации [4].

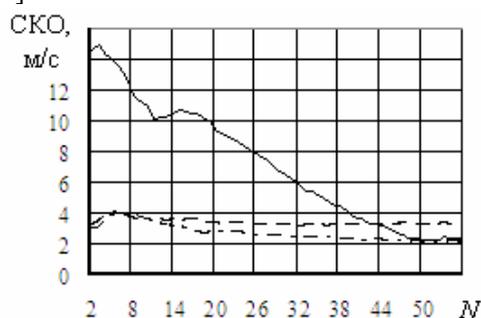


Рисунок 2 – СКО оценок скорости

На рисунке 2 представлена зависимость СКО оценки скорости цели, полученная в алгоритме многогипотезного сопровождения с S -модифицированным фильтром Калмана (пунктирная линия) и с многомодельным фильтром с параметрами: $M=2$ (штрихпунктирная линия) на фоне помех. Число помеховых отметок в строке сопровождения 10.

Выводы. Таким образом, использование S -модифицированного фильтра Калмана в алгоритме многогипотезного сопровождения позволяет устойчиво сопровождать маневрирующую цель на фоне помех. Число вычислительных операций, требуемых для реализации, уменьшается в M раз для каждого канала сопровождения. Платой за это является незначительное снижение точности оценки скорости (с 2,4 м/с до 3,6 м/с в установившемся режиме), что позволяет рекомендовать применение S -модифицированного фильтра Калмана в алгоритмах сопровождения маневрирующей цели на фоне помех.

Библиографический список

1. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Радио и связь, 1986. 401 с.
2. Blackman S., Popoli R. Design and Analysis of Modem Tracking System. Norwood, MA: Anech House, 1999. 481 с.
3. Efe M., Ruan Y. Probabilistic multihypothesis tracker: addressing some basic issues / IEE Proc.-Radar Sonar Navig. 2004, №8. С. 189-196.
4. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах. Часть 2 / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2007. – 304 с.
5. Помехозащищённость радиолокационных систем. Состояние и тенденции развития / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2003. 356 с.
6. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах. Часть 2 / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2004. – 312 с.
7. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Синтез и анализ обнаружителей радиолокационных сигналов, отражённых от маневрирующей цели / Изв. ВУЗов серия «Радиоэлектроника», 2005. №3. С. 56-62.