

УДК 681.5.03.033

А.А. Ковальчук

*Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков*

## ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СОПРОВОЖДЕНИЯ МАНЕВРИРУЮЩИХ ЦЕЛЕЙ ПО РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Большинство многоканальных РЛС наведения ракет используют узкополосные сигналы (пачки радиопульсов), что позволяет повысить их помехоустойчивость, но приводит к необходимости компенсации и измерения частоты Доплера с помощью радиотехнических следящих систем по радиальной скорости. При преодолении системы ПВО средства воздушного нападения применяют различные виды маневрирования, резко снижающие устойчивость работы этих систем. Для повышения устойчивости сопровождения маневрирующих целей по радиальной скорости в статье предложена структура адаптивного алгоритма параллельной фильтрации.

**Ключевые слова:** параллельная фильтрация, устойчивость, радиальная скорость, коррекция

### Введение

Как известно, система сопровождения целей по радиальной скорости обеспечивает работу следящих систем по дальности и угловым координатам. Срыв сопровождения по радиальной скорости приводит к потере радиоконтакта с целью, а значит, к прекращению сопровождения по дальности и по угловым координатам. Как показано в [1], при сопровождении сверхманевренных летательных аппаратов следящей системой по радиальной скорости с использованием достаточно простых алгоритмов [2], вероятность устойчивого сопровождения желает лучшего, особенно при небольших отношениях сигнал/шум.

Как показано в [3], при маневре цели с перегрузкой 6-9 единиц и периоде наблюдений 0,1 с ошибка сопровождения по радиальной скорости может превысить размер апертуры дискриминационной характеристики частотного дискриминатора за несколько (до 2 – 3) радиоконтактов, в результате чего происходит срыв слежения. Таким образом, есть необходимость рассматривать структуры адаптивных алгоритмов сопровождения по радиальной скорости,

в том числе и параллельной фильтрации, которые в состоянии обеспечить более высокую устойчивость сопровождения маневрирующих целей.

**Целью статьи** является рассмотрение вопроса повышения устойчивости сопровождения по радиальной скорости с помощью адаптивных алгоритмов параллельной фильтрации.

### Изложение основного материала

В работе [4] предложен подход к синтезу алгоритмов сопровождения цели, адаптивных к маневру цели, базирующийся на введении гипотез (альтернатив) о величине математического ожидания составляющих вектора ускорения цели. Структура системы сопровождения цели по радиальной скорости, синтезированной на основе многоальтернативной модели движения цели, приведена на рис. 1 [5].

Структура алгоритма системы сопровождения представляет  $k$  параллельно работающих фильтров (ФУО), формирующих оценки  $\hat{x}_i(n)$  согласно теории линейной фильтрации в виде условного среднего, и блок формирования результирующей оценки

(БФРО) в виде взвешенной суммы

$$\hat{\mathbf{x}}(n) = \sum_i P[H_i / \mathbf{z}(n)] \hat{\mathbf{x}}_i(n) \quad (1)$$

где  $P[H_i / \mathbf{z}(n)]$  – апостериорные вероятности гипотез;  $\hat{\mathbf{x}}_i(n)$  – оптимальная условная оценка вектора состояния цели по результатам  $n$  наблюдений в случае справедливости гипотезы  $H_i$  о среднем значении радиального ускорения цели;  $\mathbf{z}(n) = (z(1) \ z(2) \ \dots \ z(n))^T$  – вектор-столбец результатов  $n$  наблюдений радиальной скорости цели.

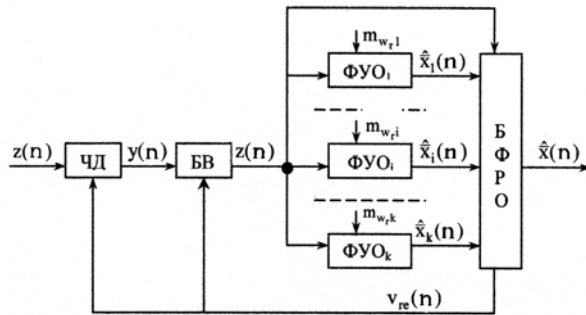


Рис. 1. Структура системы сопровождения цели по радиальной скорости с параллельной фильтрацией

Проведенные исследования показали, что в зависимости от величины ОСШ  $q$  весовой коэффициент  $P[H_i / \mathbf{z}(n)]$  для истинной гипотезы нарастает до приемлемого значения, близкого к 1, за 4 – 6 и более наблюдений [5]. В случае затягивания с принятием решения о выборе соответствующего ФУО сильно возрастает вероятность срыва сопровождения в связи с превышением динамической составляющей ошибки допустимого значения, определяемого апертурой частотного дискриминатора. В случае быстрого принятия решения существенной становится флюктуационная составляющая ошибки, что также снижает качество работы системы сопровождения с параллельной фильтрацией.

Альтернативой системам сопровождения с параллельной фильтрацией являются различные алгоритмы формирования дополнительных адаптивных поправок [6]. Применительно к дискретным системам автоматического управления предложена коррекция путем введения конечной суммы от сигнала ошибки, образующейся, например, с помощью рециркулятора [3, 7]. Существенным достоинством такой коррекции является возможность значительного уменьшения динамической ошибки, возникающей при маневре цели, даже если ширина полосы пропускания некорректированной системы очень узкая.

Структура системы сопровождения, использующая адаптивную коррекцию с помощью рециркулятора сигнала ошибки, приведена на рис. 2.

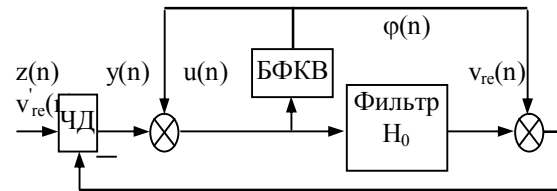


Рис. 2. Структура системы сопровождения цели по радиальной скорости с адаптивной коррекцией

В состав системы вводится блок формирования корректирующего воздействия БФКВ, в котором по величине сигнала  $u(n)$  рассчитывается отношение правдоподобия для гипотез о наличии  $H_1$  и отсутствии  $H_0$  маневра цели в данном радиоконтакте [3]. В случае, если принимается решение об отсутствии маневра, цепь коррекции не работает, и система имеет структуру и параметры, определяемые из условия минимума среднеквадратической ошибки для благоприятных условий сопровождения. При принятии решения о наличии маневра вводится сигнал коррекции для устранения динамической ошибки. Возможна не только релейная коммутация цепи коррекции, но и введение корректирующего воздействия, величина которого определяется величиной отношения правдоподобия для гипотез наличия и отсутствия маневра.

Результаты исследований показали, что предлагаемая система на участке маневрирования имеет существенно более высокую устойчивость сопровождения по сравнению с классической системой с фиксированными параметрами [2] за счет эффективного уменьшения динамической составляющей ошибки. Недостатком такой коррекции является рост флюктуационной составляющей ошибки после начала маневра цели.

Достоинства системы с параллельной фильтрацией – высокая точность сопровождения при условии правильного принятия решения о выборе соответствующего ФУО, и достоинства алгоритма сопровождения с адаптивной коррекцией – эффективное снижение динамической составляющей ошибки в моменты начала и конца маневра цели, могут быть объединены в структуре комбинированной адаптивной системы (рис. 3).

На участке отсутствия интенсивного маневра цели функционирует алгоритм сопровождения с адаптивной коррекцией (АС с АК), а после уверенного принятия решения о наличии маневра цели происходит переключение на один из двух (может быть и более) параллельно работающих фильтров условной оценки, настроенных на средние значения ускорений  $m_{w,1}$  и  $m_{w,-1}$ , равные по величине и имеющие противоположные знаки.

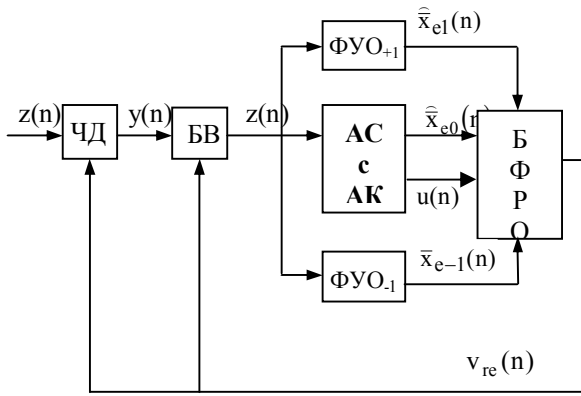


Рис. 3. Комбинируванна адаптивна система супроводження

С помощью моделирования на ПЭВМ проведено сравнение качества функционирования комбинированного и классического алгоритма с фиксированными параметрами [2] при использовании типовых траекторий маневра цели. Одним из вариантов рассматривался разворот на  $180^{\circ}$  с малым радиусом и максимальной перегрузкой, другим - маневр, входящий в состав более сложных, при котором цель, начиная с некоторого момента времени, осуществляет поворот на  $90^{\circ}$ , а затем возвращается к исходному углу курса (рис. 4, 5).

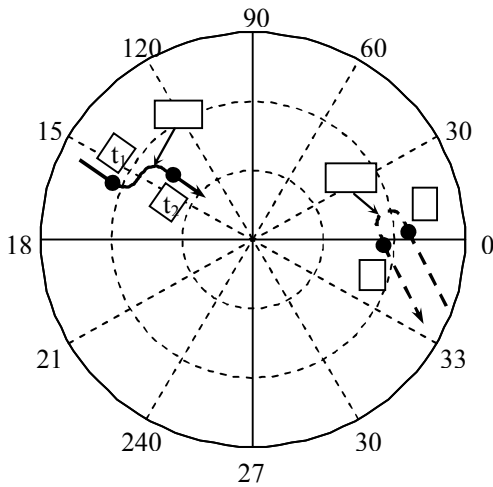


Рис. 4. Траектории движения цели

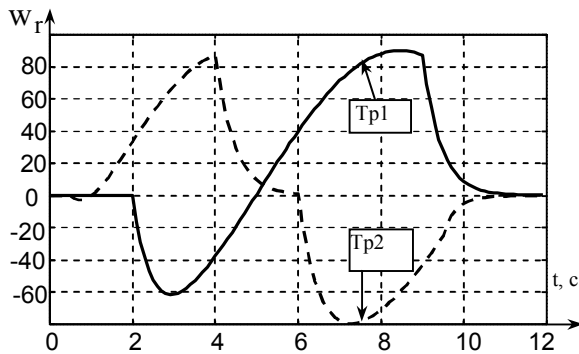


Рис. 5. Зависимость радиального ускорения цели от времени

Сравнение качества функционирования алгоритмов проводилось по величине среднеквадратических ошибок сопровождения цели по радиальной скорости (рис. 6, 7: сплошные линии – комбинированный алгоритм, пунктир – алгоритм с фиксированными параметрами), а также по устойчивости сопровождения на интервале наблюдения 12с с периодом наблюдений 0,1с.

Все статистические расчеты выполнялись путем проведения многократного ( $10^3 \dots 10^6$ ) прогона и определения результата по множеству реализаций. В ходе исследований проводилось сопоставление получаемых результатов с результатами, имеющими место в известной структуре системы [2], параметры которой задавались исходя из высокой вероятности совершения целью интенсивного маневра (среднеквадратическое ускорение  $\sigma_m = 35 \text{ м/с}^2$ , постоянная маневрирования  $\tau_m = 8 \text{ с}$ ).

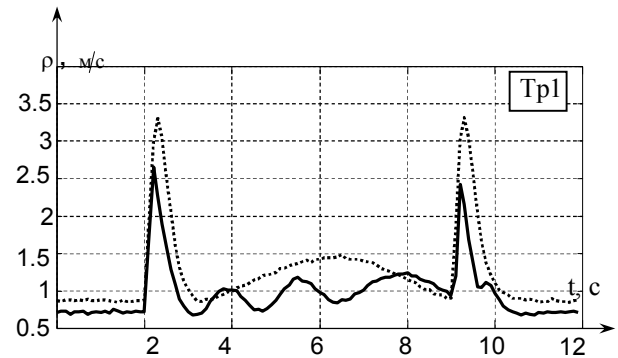


Рис. 6. Среднеквадратическая ошибка сопровождения при движении цели по первой траектории

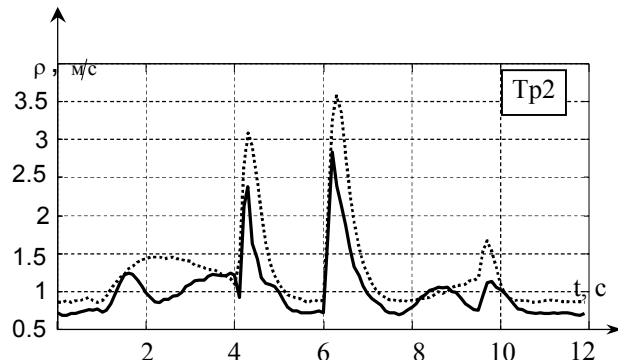


Рис. 7. Среднеквадратическая ошибка сопровождения при движении цели по второй траектории

Проведенный расчет вероятности устойчивого сопровождения на интервале 12с показал уверенное снижение среднеквадратической ошибки и существенно меньший выброс в моменты начала и конца маневра цели.

Вероятность устойчивого сопровождения с использованием предлагаемого алгоритма улучшена с 0,6 до 0,9 при отношении сигнал/шум по мощности, равном 16.

## Выводы

1. Использование адаптивных алгоритмов позволяет повысить устойчивость сопровождения маневрирующих целей по радиальной скорости.

2. Наиболее опасными интервалами времени с точки зрения срыва сопровождения являются начало и конец маневра цели (рис. 6, 7), на которых наблюдается короткий выброс ошибки сопровождения, обусловленный в основном динамической составляющей. Адаптивные алгоритмы сопровождения должны в первую очередь обеспечивать его снижение, что возможно только при условии правильного принятия решения по 2 – 3 наблюдениям при периоде 0,1 с.

Обеспечить верное определение начала (конца) маневра и, соответственно, выбор ФУО в алгоритме с параллельной фильтрацией (рис. 1) за такое малое количество наблюдений при небольших отношениях сигнал/шум практически невозможно.

Ошибочное решение о маневре в алгоритме с адаптивной коррекцией (рис. 2) кроме некоторого увеличения дисперсии флюктуационной составляющей ошибки не приводит к существенному ухудшению устойчивости сопровождения, и поэтому такие алгоритмы для системы сопровождения по радиальной скорости являются более предпочтительными.

3. В комбинированном алгоритме следящей системы по радиальной скорости (рис. 3) предложен подход, который заключается в том, что при малой вероятности маневра цели сопровождение осуществляется узкополосным фильтром, а при увеличении такой вероятности производится расширение его полосы путем соответствующей коррекции. При высокой вероятности маневра цели производится выбор соответствующего узкополосного ФУО со

смещением, что приводит к снижению как динамической, так и флюктуационной ошибки, что существенно повышает устойчивость сопровождения цели на участке маневра.

## Список литературы

1. Ковальчук А.А. Оценка устойчивости сопровождения маневрирующих целей по радиальной скорости многоканальной РЛС / А.А. Ковальчук // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС. – 2010. – Вип. 1(82). – С. 58-60.
2. Зингер Р.А. Оценка характеристик оптимального фильтра для слежения за пилотируемой целью / Р.А. Зингер // Зарубежная радиоэлектроника. – 1971. – №8. – С. 40-57.
3. Ковальчук А.А. Структура алгоритма сопровождения с адаптивным рециркулятором сигнала ошибки для повышения устойчивости сопровождения маневрирующих целей по радиальной скорости / А.А. Ковальчук // Системи обробки інформації / НАНУ, ПАНИ, ХВУ. – Х., 2002. – Вип. 5(21). – С. 42-45.
4. Хисматулин В.Ш. Многоальтернативные алгоритмы слежения за маневрирующим объектом / В.Ш. Хисматулин, И.И. Сачук, А.О. Ковальчук // Збірник наукових праць ХВУ. – Х.: ХВУ. – 2001. – Вип. 4 (34). – С. 92-95.
5. Ковальчук А.А. Адаптивные алгоритмы сопровождения целей по радиальной скорости с параллельной фильтрацией / А.О. Ковальчук, О.О. Сосунов, В.Ш. Хисматулин // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС. – 2006. – Вип. 5. – С. 123-127.
6. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация / С.З. Кузьмин. – К.: КВИЦ, 2000. – 428 с.
7. Ковальчук А.О. Адаптивные алгоритмы сопровождения маневрирующих целей по радиальной скорости / А.О. Ковальчук, В.Ш. Хисматулин // Радиотехника. – 2005. – №6. – С. 46-54.

Поступила в редколлегию 15.12.2009

**Рецензент:** канд. техн. наук, проф. В.Ш. Хисматулин, Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков.

## ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ СУПРОВОДЖЕННЯ МАНЕВРУЮЧИХ ЦІЛЕЙ ПО РАДІАЛЬНІЙ ШВИДКОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМУ ПАРАЛЕЛЬНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ

А.О. Ковальчук

*Більшість багатоканальних РЛС наведення ракет використовують вузькосмугові сигнали (пачки радіоімпульсів), що дозволяє підвищити їх завадостійкість, але призводить до необхідності компенсації і вимірювання частоти Доплера за допомогою радіотехнічних слідкуючих систем по радіальній швидкості. При подоланні системи ППО засоби повітряного нападу застосовують різні види маневрування, що різко знижують стійкість роботи цих систем. Для підвищення стійкості супроводження маневруючих цілей по радіальній швидкості в статті запропонована структура адаптивного алгоритму паралельної фільтрації.*

**Ключові слова:** паралельна фільтрація, стійкість, радіальна швидкість, корекція.

## IMPROVING IN-RANGE TRACK STABILITY OF MANEUVERING TARGETS USING ADAPTIVE ALGORITHM OF PARALLEL FILTERING

A.A. Kovalchuk

*Most of multiple-channel missile guiding radars employ narrowband radar signals (pulse trains) that provide high interference immunity but leads at the same time to of measuring and compensating for Doppler frequency using in-range tracking systems. When breaking through the air defense system, the air attack means employ different kinds of maneuvers, which reduce drastically efficiency of such tracking systems. In order to improve the track stability of maneuvering targets by radial range, the structure of adaptive algorithm for parallel filtering is proposed in the paper.*

**Keywords:** parallel filtering, track stability, radial velocity, correction.