

УДК 629.7.05

Алгоритм обработки информации активно-пассивных систем комплекса бортового радиоэлектронного оборудования самолета фронтальной авиации

С.Л. Иванов, Д.В. Селиверстов

Аннотация. В работе приводится описание функционирования адаптивного алгоритма совместной обработки информации бортовой РЛС и бортовой станции радиотехнической разведки самолета фронтальной авиации, обеспечивающего сопровождение воздушных целей с разными динамическими характеристиками на основе использования для адаптации решений о типе целей от станции радиотехнической разведки.

Ключевые слова: БРЛС, СРТР, комплексная обработка, адаптивная фильтрация, распознавание целей.

В процессе функционирования комплекса бортового РЭО самолета фронтальной авиации на его борту решается задача высокоточного измерения координат воздушных целей (ВЦ) различных типов, существенно отличающихся друг от друга по маневренным свойствам. В бортовой радиолокационной станции (БРЛС) решение указанной задачи осуществляется на этапе вторичной обработки информации путем реализации алгоритмов линейной фильтрации [1]. Применение таких алгоритмов фильтрации в большинстве случаев основывается на использовании математических моделей движения аэродинамических объектов, в которых их маневренные способности описываются фиксированным набором параметров: дисперсией ускорения, коэффициентами маневренности и некоторыми другими [2, 3].

На практике характеристики сопровождаемых ВЦ могут значительно отличаться от характеристик исходных математических моделей, что является причиной снижения точности формируемых оценок фазовых координат и, как следствие, уменьшения эффективности решения истребителем задач по предназначению. В этих условиях возникает потребность в реализации в составе алгоритмического обеспечения бортовой

вычислительной системы адаптации процедур фильтрации к характеристикам маневренности обнаруживаемых ВЦ.

В настоящее время известно большое количество способов адаптации следящих систем к изменяющимся условиям наблюдения [3]. Однако реализация наиболее эффективных из них на борту самолета-истребителя ограничена из-за потребностей в значительных вычислительных ресурсах.

Проведенный анализ особенностей функционирования комплекса бортового радиоэлектронного оборудования самолета-истребителя позволяет судить о возможном наличии на его борту в процессе боевой работы дополнительной информации, косвенно характеризующей маневренные свойства сопровождаемых БРЛС ВЦ. Так известно, что бортовая станция радиотехнической разведки (СРТР) в результате обработки сигналов, излучаемых радиоэлектронными средствами (РЭС) целей, формирует оценки пространственных координат РЭС, а также решения о классах носителей РЭС. При этом важно отметить, что подмножества ВЦ, образующие соответствующие классы распознавания, как правило, имеют одинаковое функциональное предназначение и состоят из объектов, имеющих схожие характеристики маневренности. Поэтому использование результатов классификации целей в СРТР для адаптации следящих фильтров БРЛС позволит повысить точность оценивания координат и параметров движения сопровождаемых ВЦ.

Цель работы – синтез алгоритма адаптивной фильтрации фазовых координат обнаруживаемых БРЛС ВЦ, основанного на использовании результатов распознавания классов целей в СРТР.

Решим задачу синтеза алгоритма адаптивной фильтрации, используя в качестве теоретической основы теорию обработки информации в дискретных системах со случайной скачкообразной структурой (ССС) [4], при следующих ограничениях:

- БРЛС функционирует в режиме сопровождения на проходе (СНП) воздушных целей, которые по маневренным характеристикам могут быть разделены на классы $\{s_0$ - «неманевренная», s_1 - «ограниченной маневренности», s_2 - «маневренная»} с темпом обращения к цели $\tau_{\partial \bar{v}n}$;

- радиоэлектронные системы находящихся в пределах зоны поиска БРЛС ВЦ работают в активном режиме с периодом излучения радиосигналов $\tau_{pэс}$, причем $\tau_{pэс} = w\tau_{pлс}$, где w - коэффициент пропорциональности;

- в СРТР формируются оценки пеленгов ВЦ в горизонтальной плоскости, а также решения о принадлежности целей к классам $\{\varepsilon_0$ - «высокотехнологичный истребитель», ε_1 -

«истребитель», ε_2 - «самолет ДРЛО», ε_3 - «управляемая ракета с активной ГСН»} с вероятностью правильного распознавания $P_{np} \geq P_{np0}$;

- известны условные вероятности связей соответствующих алфавитов классов ВЦ $P(\varepsilon_j | s_i)$, $j = \overline{0,3}; i = \overline{0,2}$.

Рассматриваемая задача может быть сформулирована следующим образом. Предположим, что в дискретные моменты времени k изменение фазовых координат ВЦ s -го класса описывается выражением

$$X_k = \Phi_{k,k-1}(s)X_{k-1} + \xi(s)_{k-1}, \quad (1)$$

где динамическая матрица $\Phi_{k,k-1}(s)$ имеет вид [2]

$$\Phi_{k,k-1}(s) = \begin{bmatrix} 1 & \tau & \frac{1}{\alpha^2(s)}(-1 + \alpha(s)\tau + e^{-\alpha(s)\tau}) \\ 0 & 1 & \frac{1}{\alpha(s)}(1 - e^{-\alpha(s)\tau}) \\ 0 & 0 & e^{-\alpha(s)\tau} \end{bmatrix}.$$

Будем считать, что в течение всего времени сопровождения воздушной цели её класс не изменяется

$$q(s_k | s_{k-1}) = \begin{cases} 1, & s_k = s_{k-1} \\ 0, & s_k \neq s_{k-1} \end{cases}. \quad (2)$$

Измерения соответствующих координат и параметров движения ВЦ в БРЛС и СРТР описываются выражениями

$$Z_k = H_Z X_k + \xi_{Zk}, \quad Y_v = H_Y X_v + \xi_{Yv}, \quad (3)$$

$$\tau_{плс} = t_k - t_{k-1}, \quad \tau_{рзс} = t_v - t_{v-1}. \quad (4)$$

Кроме того, в СРТР подлежат оцениванию параметры принимаемых радиосигналов РЭС ВЦ X_{cv} . В результате формируются решения ρ_v о классе ВЦ в соответствии с алфавитом $\{\varepsilon_j\}$, $j = \overline{0,3}$. При этом могут быть определены статические вероятностные характеристики процесса распознавания

$$\pi(\rho_v | \varepsilon_{jv}). \quad (5)$$

В выражениях (1) – (4) приняты обозначения: $\alpha(s)$ - коэффициент маневренности ВЦ s -го класса; $\xi(s)_k$ - вектор гауссовских дискретных белых шумов с корреляционной

матрицей (КМ) $R_\xi(s)$; $q(s_k | s_{k-1})$ - условные вероятности изменения класса ВЦ; H_Z, H_Y - матрицы связей векторов Z_k и X_k, Y_v и X_v ; ξ_Z, ξ_Y - векторы взаимно независимых гауссовских дискретных белых шумов с КМ R_Z и R_Y .

Комплексная обработка информации БРЛС и СРТР возможна только в случае принадлежности обрабатываемых в данных станциях радиосигналов одной ВЦ. Пространственное отождествление принимаемых сигналов может быть выполнено при использовании критерия максимума вероятности правильного не отождествления азимутальных пеленгов разных ВЦ при заданной вероятности ошибки первого рода. Тогда решающее правило может быть представлено в виде

$$\begin{array}{c} H_0 \\ |\hat{\phi}_{\Gamma Z} - \hat{\phi}_{\Gamma Y}| > \Phi_{II} \\ \leq \\ H_1 \end{array} \quad (6)$$

$$\Phi_{II} = \sqrt{\sigma_{\phi Z}^2 + \sigma_{\phi Y}^2} F^{-1} \left\{ 1 - \frac{P(H_0 | H_1)}{2} \right\}, \quad (7)$$

где $\hat{\phi}_{\Gamma Z}, \hat{\phi}_{\Gamma Y}, \sigma_{\phi Z}, \sigma_{\phi Y}$ - оценки пеленгов ВЦ, формируемые в БРЛС и СРТР, и СКО этих оценок соответственно; H_0, H_1 - гипотезы о принадлежности сигналов разным целям и одной цели соответственно; $P(H_0 | H_1)$ - вероятность ошибки первого рода; $F\{\cdot\}$ - табулированный интеграл вероятностей.

Достаточной статистикой для оптимального в некотором смысле оценивания случайных величин X_k и s_k является совместная плотность вероятностей $f(X_k, s_k)$, которая в общем случае определяется рекуррентным выражением

$$f(X_k, s_k) = C \pi(\rho_k | s_k) f(Z_k | X_k, s_k) \sum_{s_{k-1}} P(s_{k-1}) q(s_k | s_{k-1}) \int_{-\infty}^{\infty} f(X_k | X_{k-1}, s_k) f(X_{k-1} | s_{k-1}) dX_{k-1},$$

где C - нормировочный коэффициент.

Вычисление $f(X_k, s_k)$ связано с необходимостью выполнения большого числа расчетных операций и не реализуемо в бортовых вычислителях. При использовании гауссовской аппроксимации условной плотности вероятностей $f(X_{k-1} | s_{k-1}) = N\{\hat{X}(s_{k-1}), R(s_{k-1})\}$, выражения, определяющие квазиоптимальный адаптивный алгоритм фильтрации фазовых координат ВЦ могут быть записаны в виде:

- для оценок классов ВЦ

$$\hat{s}_k = \operatorname{argmax}_{s_k=0,1,2} \{P(s_k)\}, \quad (8)$$

$$\text{где } P(s_k) = \frac{a(s_k)}{\sum_{s_k} a(s_k)}, \quad a(s_k) = \begin{cases} \pi(\rho_k | s_k) \sum_{s_{k-1}} \{P(s_{k-1})q(s_k | s_{k-1})\Lambda(s_{k-1})\}, & k = nw, n = 0,1,2\dots \\ \sum_{s_{k-1}} \{P(s_{k-1})q(s_k | s_{k-1})\Lambda(s_{k-1})\}, & k \neq nw, n = 0,1,2\dots \end{cases},$$

$$\Lambda(s_{k-1}) = |\Theta(s_{k-1})|^{-1/2} \exp\left\{-\frac{1}{2} \Delta^T(s_{k-1})\Theta^{-1}(s_{k-1})\Delta(s_{k-1})\right\},$$

$$\Theta(s_{k-1}) = H_Z \tilde{R}(s_{k-1}) H_Z^T + R_Z,$$

$$\Delta(s_{k-1}) = Z_{Z_{k-1}} - H_Z \tilde{X}(s_{k-1}),$$

$$\tilde{X}(s_k) = \Phi(s) \hat{X}(s_{k-1}),$$

$$\tilde{R}(s_k) = \Phi(s) R(s_{k-1}) \Phi^T(s) + R_\xi,$$

$$\pi(\rho_k | s_k) = \sum_{\varepsilon} \{\pi(\rho_k | \varepsilon) P(\varepsilon | s_k)\};$$

- для условных оценок фазовых координат ВЦ:

$$\hat{X}(s_k) = \frac{\sum_{s_{k-1}} \{P(s_{k-1})q(s_k | s_{k-1})\Lambda(s_{k-1})\mu(s_{k-1})\}}{\sum_{s_{k-1}} \{P(s_{k-1})q(s_k | s_{k-1})\Lambda(s_{k-1})\}}, \quad (9)$$

$$\text{где } \mu(s_{k-1}) = \tilde{X}(s_{k-1}) + K(s_{k-1})\Delta(s_{k-1}), \quad K(s_{k-1}) = \tilde{R}(s_{k-1})H_Z^T \Theta^{-1}(s_{k-1});$$

- для КМ ошибок условных оценок фазовых координат ВЦ

$$R(s_k) = \frac{\sum_{s_{k-1}} \left\{ P(s_{k-1})q(s_k | s_{k-1})\Lambda(s_{k-1}) \left[\Omega(s_{k-1}) + (\hat{X}(s_k) - \mu(s_{k-1}))(\hat{X}(s_k) - \mu(s_{k-1}))^T \right] \right\}}{\sum_{s_{k-1}} \{P(s_{k-1})q(s_k | s_{k-1})\Lambda(s_{k-1})\}}, \quad (10)$$

$$\text{где } \Omega(s_{k-1}) = \tilde{R}(s_{k-1}) - \tilde{R}(s_{k-1})H_Z^T \Theta^{-1}(s_{k-1})H_Z \tilde{R}(s_{k-1}),$$

- для безусловных оценок фазовых координат ВЦ и КМ ошибок безусловных оценок фазовых координат ВЦ

$$\hat{X}_k = \sum_{s_k} \{P(s_k) \hat{X}(s_k)\}, \quad (11)$$

$$R_k = \sum_{s_k} \{[R(s_k) + \hat{X}(s_k)\hat{X}^T(s_k)]P(s_k)\} - \hat{X}_k \hat{X}_k^T. \quad (12)$$

Квазиоптимальный алгоритм (8)–(12) представляет собой трехканальный адаптивный следящий фильтр, в каждом канале которого выполняются процедуры линейной фильтрации, обеспечивающие эффективное сопровождение ВЦ определенного класса из множества $\{s_i\}$,

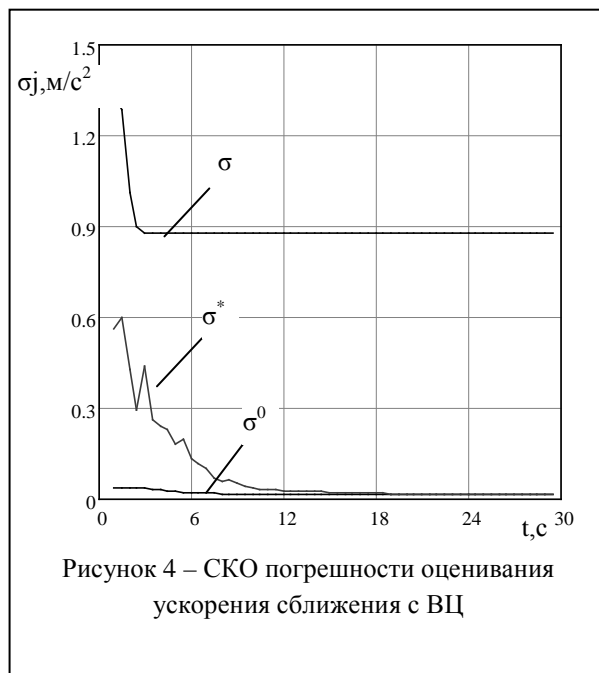
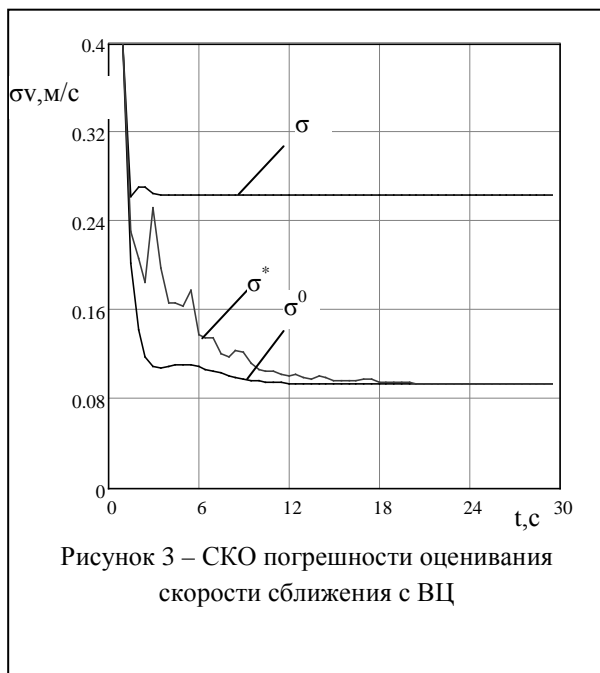
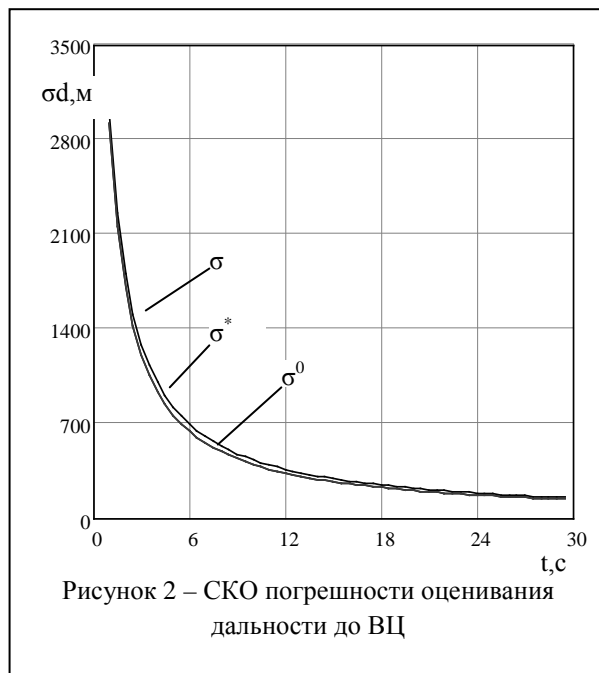
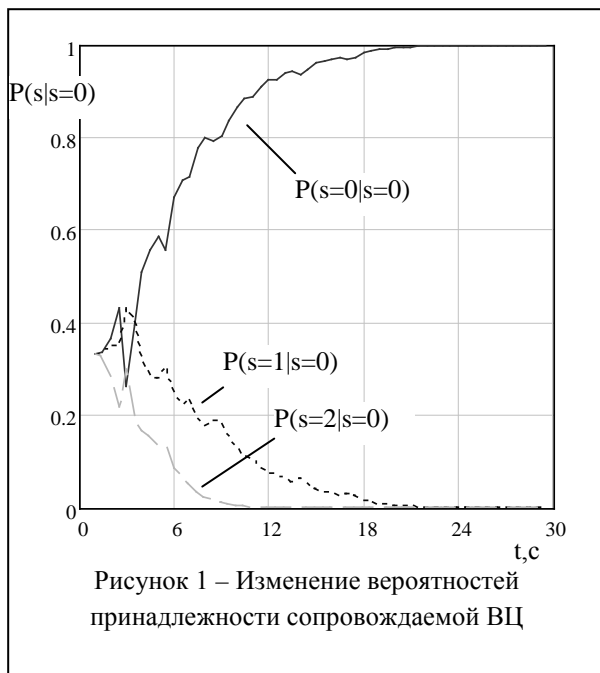
$i=1,2,3$. Итоговые оценки фазовых координат ВЦ вычисляются в результате весового суммирования условных оценок, формируемых каждым из каналов, с весами, пропорциональными вероятностям наблюдения ВЦ соответствующего класса.

Оценка эффективности синтезированного алгоритма проводилась методом имитационного моделирования при использовании исходных данных из таблицы 1, применительно к сопровождению ВЦ дальномерным каналом БРЛС.

Таблица 1 – Исходные данные моделирования

№ п/п	Наименование характеристики, единицы измерения	Значение характеристики
1	Коэффициенты маневренности $\alpha(s)$ ВЦ классов $s_0/s_1/s_2$, c^{-1}	0,025/ 0,033/ 0,1
2	Темп обращения к цели $\tau_{двн}$, с	0,5
3	Коэффициент пропорциональности w	4
4	Вероятность правильного распознавания классов ВЦ в СРТР $P_{д0}$	0,9
5	Вероятность ошибки 1-го рода $P(H_0 H_1)$ при отождествлении сигналов	0,1
6	Начальные условия сопровождения ВЦ: - дальность до ВЦ, м - скорость сближения, м/с	100 000 500
7	СКО первичных измерений БРЛС: - дальности, м - радиальной скорости, м/с - углового положения, град	3000 20 1,5
8	СКО измерений СРТР пеленга ВЦ, град	3

На рисунке 1 представлены единичные реализации изменений во времени оценок вероятностей принадлежности ВЦ к s_i -м классам, $i = \overline{0,2}$, формируемых в соответствии с выражениями (8), при условии наблюдения цели s_0 -го класса. Анализ данных зависимостей позволяет считать, что в рассматриваемых условиях синтезируемый алгоритм обеспечивает формирование правильных решений о классе цели за ограниченное время наблюдения.



На рисунках 2 – 4 представлена динамика изменения апостериорных среднеквадратических отклонений (СКО) оценок дальности, скорости сближения и ускорения сближения с ВЦ s_0 -го класса, соответствующая графику рисунка 1. Здесь приняты обозначения: σ - СКО оценивания фазовых координат, соответствующие квазиоптимальному неадаптивному алгоритму фильтрации, настроенному на сопровождение наиболее маневренных ВЦ (s_2 -й класс); σ^0 - СКО оценивания фазовых координат для идеального трехканального фильтра, в котором определение класса цели и переключение канала сопровождения осуществляется мгновенно; σ^* - СКО оценивания фазовых координат для синтезированного алгоритма.

Анализ представленных зависимостей позволяет сделать вывод, что по мере накопления информации о траекторных признаках сопровождаемой ВЦ характеристики синтезированного алгоритма приближаются к характеристикам идеального алгоритма фильтрации. Вместе с тем, положительный эффект в фильтрации фазовых координат от реализации адаптивной следящей схемы наиболее существенно проявляется при оценивании ускорений сближения с ВЦ.

Таким образом, проведенное моделирование позволяет судить о работоспособности синтезированного алгоритма. Реализация алгоритма позволит обеспечить бесрывное и точное сопровождение ВЦ, существенно отличающихся маневренными возможностями, и обеспечит повышение точности сопровождения «неманевренных» и «ограниченно маневренных» ВЦ по сравнению с алгоритмами неадаптивной линейной фильтрации.

Библиографический список

1. Дудник П.И., Кондратенков Г.С., Татарский Б.Г., Ильчук А.Р., Герасимов А.А. Авиационные радиолокационные комплексы и системы: учебник для слушателей и курсантов ВУЗов ВВС / Под ред. П.И. Дудника. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2006. 1112 с., ил.

2. Зингер Р.А. Оценка характеристик оптимального фильтра для слежения за пилотируемой целью // Зарубежная радиоэлектроника. – 1971. – №8. С. 15-30.

3. Авиационные системы радиопередачи. Т.1. Принципы построения систем радиопередачи. Основы синтеза и анализа / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: «Радиотехника», 2003. -192 с., ил.

4. Бухалёв В.А. Распознавание, оценивание и управление в системах со случайной скачкообразной структурой. – М.: Наука. Физматлит, 1996. 288 с., ил.

Сведения об авторах

Аврамов Андрей Викторович; доцент, начальник кафедры авиационных радиоэлектронных комплексов; Воронежского Военного авиационного инженерного университета; к.т.н., тел.: 8-980-347-12-96, e-mail: andry_a@inbox.ru).

Иванов Станислав Леонидович; адъюнкт кафедры авиационных радиоэлектронных комплексов; Воронежского Военного авиационного инженерного университета; тел.: 8-980-348-92-21, e-mail: st.iv.84@mail.ru).

Селиверстов Дмитрий Вячеславович; курсант Воронежского Военного авиационного инженерного университета; г. Воронеж; 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, д. 156.

г. Воронеж; 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, д. 156.