

О.Л. Смирнов, О.Н. Ставицкий, А.А. Наконечный

Харьковский национальный университет Воздушных сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМА СОПРОВОЖДЕНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РЛС

Рассмотрен принцип управления параметрами режима сопровождения многофункциональной РЛС, основанный на учёте изменения уровней шумов в канале измерений РЛС и модели динамики сопровождаемой цели, адаптивный к её перемещению в пространстве. Приведён иллюстративный пример расчёта количества одновременно сопровождаемых целей при традиционном и предлагаемом подходах к управлению анализируемым режимом. Подтверждена эффективность полученных решений.

Ключевые слова: многофункциональная РЛС, режим сопровождения, адаптивное управление.

Введение

Режим сопровождения многофункциональной радиолокационной станции (МФ РЛС) представляет собой совокупность правил, определяющих взаимодействие основных устройств РЛС и алгоритмов её управляющего вычислительного комплекса при решении задачи сопровождения траекторий ранее обнаруженных в заданной области пространства воздушных целей. При этом наличие у МФ РЛС фазированной антенной решётки (ФАР) обеспечивает принципиальную возможность применения оптимального управления рассматриваемым режимом, которое заключается в целенаправленном изменении его параметров для достижения требуемых значений соответствующих показателей качества [1; 2].

Связь между характеристиками основных устройств МФ РЛС и подлежащими оптимизации параметрами режима сопровождения может быть установлена посредством уравнения радиолокации, которое описывает энергетические соотношения в системе "РЛС-цель" [3; 4]:

$$\frac{E_c}{N} = \frac{G_a^2 \lambda^2 \sigma_c E_{in}}{(4\pi)^3 N_{sh} k T_0 R^4}, \quad (1)$$

где E_c – энергия принятого сигнала, Дж;

N – спектральная плотность шума измерений, Вт/Гц;

G_a – коэффициент усиления приемо-передающей антенны РЛС, дБ;

λ – длина волны излучения РЛС, м;

σ_c – эффективная поверхность рассеивания (ЭПР) цели, м²;

E_{in} – энергия зондирующего сигнала, Дж;

N_{sh} – коэффициент шума приёмника РЛС, дБ;

k – постоянная Больцмана, Дж/град;

T_0 – опорная температура, град;

R – дальность до сопровождаемой цели, м.

Отношение сигнал/шум E_c/N определяет величину ошибки однократных измерений оцениваемой координаты сопровождаемой цели, поэтому управление рассматриваемым режимом МФ РЛС фактически сводится к расчёту длительности такта измерения координат цели (объёма пачки зондирующих сигналов) и периода повторения этого такта, которые обеспечивают получение требуемой точности оценки координат обслуживаемой цели к заданному временному или пространственному рубежу [4–7].

Классические принципы управления режимом сопровождения МФ РЛС.

Традиционные способы управления анализируемым режимом, основанные на использовании ограниченной выборки измерений оцениваемой координаты сопровождаемой цели или на уравнениях оптимальной линейной рекуррентной фильтрации параметров её траектории, предполагают, что в течение анализируемого временного отрезка (интервала сопровождения) отношение сигнал/шум в канале измерений РЛС будет постоянным. Результатом такого управления является применение фиксированного значения длительности такта измерения координат сопровождаемой цели, период повторения которого обычно равен периоду обзора РЛС [2; 8].

Вместе с тем фиксированный период обновления данных по обслуживаемой цели позволяет получить требуемые точностные характеристики выдаваемой РЛС координатной информации только в случае равномерного и прямолинейного движения этой цели [6; 8; 9]. Далее, предположение о постоянстве отношения E_c/N эквивалентно тому, что спектральная плотность шума измерений координат N также должна считаться постоянной. Однако анализ

уравнения (1) показывает, что закон изменения величины H описывается соотношением вида [5]:

$$H = H_0 (R/R_0)^4, \quad (2)$$

где H_0 – уровень шума на стандартной дальности R_0 , при котором отношение сигнал/шум равно единице.

Следовательно, уровень шума в канале измерений РЛС зависит от пространственного расположения цели в зоне её обзора и предположение о его постоянстве также не соответствует действительности.

Таким образом, традиционный подход к построению алгоритмов управления режимом сопровождения не обеспечивает заданной эффективности этого управления не только при сопровождении маневрирующей цели, но и при значительном диапазоне её перемещений по зоне обзора МФ РЛС. Другими словами, существует противоречие между теоретической необходимостью использования переменных значений основных параметров рассматриваемого режима (длительности такта измерения координат сопровождаемой цели и темпа обновления данных) – с одной стороны, и существующей практикой применения фиксированных значений указанных параметров – с другой.

Отметим, что в настоящее время известны различные варианты решения данной проблемы. Например, постоянство отношения сигнал/шум при изменении дальности до сопровождаемой цели может быть достигнуто путём выбора соответствующих параметров зондирующего сигнала – длительности импульса и мощности излучения РЛС, а для обслуживания маневрирующей цели возможно применение различных модификаций используемых алгоритмов управления, позволяющих учесть изменение характера её движения [1–3; 6–10]. Однако разработка закона управления режимом сопровождения РЛС, реализующего т.н. “активное сопровождение” (применение переменных значений периода обновления данных по сопровождаемой цели и времени её облучения), в рамках классического подхода к этому вопросу практически неосуществима [8; 9].

Адаптивное управление режимом сопровождения МФ РЛС.

Одним из способов разрешения сложившейся ситуации является применение положений линейной теории статистически оптимальных оценок и управления [11], согласно которым эволюция оцениваемой координаты сопровождаемой цели моделируется как линейная система с непрерывным временем, а её измерения являются результатом дискретизации соответствующего непрерывного сигнала, поступающего на вход канала измерений РЛС. При этом как шум этих измерений, так и шум маневрирования, учитывающий возмущение параметров траек-

тории цели, обусловленное её маневром, представляются в виде гауссовских случайных процессов.

Использование подобного подхода в работе [12] позволило описать в общем виде закон управления режимом сопровождения, адаптивный к изменению уровней шумов в канале измерений РЛС и в модели динамики обслуживаемой цели. Рассчитанные согласно этому закону параметры рассматриваемого режима (длительность такта измерения координат цели и период его повторения) обеспечивают минимально возможное значение ошибки сопровождения при заданных характеристиках цели и РЛС.

Вместе с тем, анализ аналогичной по тематике и полученным результатам статьи [13] свидетельствует о том, что используемый в [12] показатель качества управления режимом сопровождения является выпуклой функцией длительности такта измерений. Тогда искомое значение этого параметра, найденное в анализируемой работе путём минимизации данного показателя, соответствует случаю сопровождения цели с максимально возможной точностью. Однако на практике РЛС должна выдавать траекторную информацию не с максимальной, а с требуемой точностью. При этом очевидно, что дополнительное снижение величины ошибки оценки координат цели приводит к увеличению длительности такта измерений и, в конечном счёте, уменьшению количества одновременно сопровождаемых РЛС целей.

Таким образом, рассматриваемая проблема выбора оптимальных параметров режима сопровождения в настоящее время далека от разрешения, что и обуславливает необходимость проведения дальнейших исследований.

Выбор оптимальных параметров режима сопровождения

Современные МФ РЛС используют широкий набор зондирующих сигналов, предназначенных для реализации соответствующих функциональных режимов в различных условиях целевой и помеховой обстановки. Например, для обеспечения высокой помехозащищённости рассматриваемой РЛС в режиме сопровождения в качестве зондирующего может применяться т.н. квазинепрерывный (КН) сигнал в виде последовательности (пачки) немодулированных когерентных импульсов с высокой частотой повторения [14–17].

В общем случае временная диаграмма работы МФ РЛС представляет собой непрерывное чередование тактов зондирования, соответствующих различным функциональным режимам. При этом такт режима сопровождения (такт измерения длительностью τ согласно принятой в настоящей работе терминологии) формируется, как показано на рис. 1 [7; 14–17].

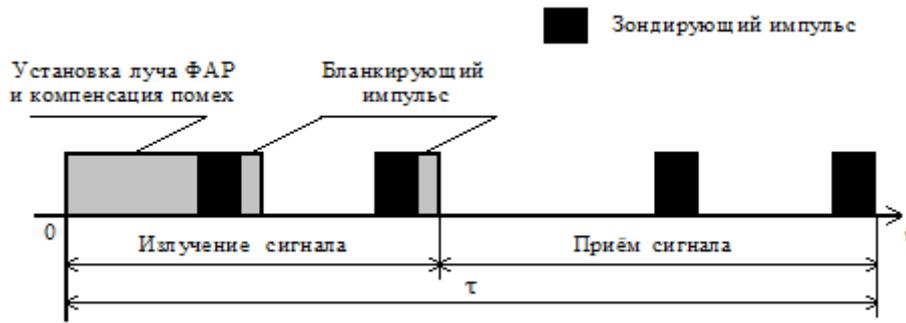


Рис. 1. Такт измерения координат сопровождаемой цели

Анализ рис. 1 позволяет сделать вывод о том, что часть времени (обозначим её как τ_0) используется для формирования собственно канала измерений и не входит непосредственно в сам процесс определения координат цели, т.е. является непроизводительными потерями [12]. Игнорирование этого факта при принятой математической модели системы "РЛС-цель" приводит к вырожденности решения рассматриваемой оптимизационной задачи – т.е. к проведению непрерывных измерений бесконечно малой длительности [18]. Действительно, законы адаптивного управления режимом сопровождения, полученные в работе [12], имеют подобный вид при $\tau_0 = 0$.

Величина τ_0 складывается из времени, расходуемого на установку луча ФАР в требуемом угловом направлении и автоматическую компенсацию помех, а также суммарной длительности бланкирующих импульсов, обеспечивающих режекцию пассивных помех до начала обработки принимаемой информации, и может составлять, например, $\tau_0 = 300$ мкс [14–17].

Пусть при обработке радиолокационной информации по сопровождаемой цели применяется прямоугольная система координат. Тогда эволюция любой из этих координат во времени может быть описана следующим линейным стохастическим стационарным дифференциальным уравнением первого порядка [6; 12]:

$$\dot{x}(t) = ax(t) + \eta(t), \quad (3)$$

где $x(t)$ – оцениваемая координата, м;

a – величина, обратная постоянной времени исследуемого процесса, Гц;

$\eta(t)$ – белый центрированный гауссовский шум с дисперсией $\sigma_\eta^2 = \text{const} > 0, \text{ м}^2/\text{с}^2$.

Второе слагаемое в выражении (3) является т.н. шумом маневрирования, учитывающим изменения параметров траектории цели, обусловленные её маневром [6]. Для дальнейшего анализа влияния этого шума на точность сопровождения цели используем следующее отношение [19]:

$$G = \sigma_\eta^2 / \Delta f, \quad (4)$$

где G – интенсивность шума модели динамики цели, $\text{м}^2/\text{с}$;

Δf – ширина полосы пропускания канала измерений РЛС, Гц.

Измерения координаты x представляют собой процесс усреднения непрерывного сигнала $y(t)$ [12]:

$$y(t) = x(t) + \omega(t), \quad (5)$$

где $\omega(t)$ – белый центрированный гауссовский шум с дисперсией $\sigma_\omega^2 = \text{const} > 0, \text{ м}^2$.

Количественно уровень шума в канале измерений РЛС, характеризующий величину ошибок этих измерений, может быть оценён по аналогии с выражением (4):

$$H = \sigma_\omega^2 / \Delta f, \quad (6)$$

где H – интенсивность шума измерений, $\text{м}^2/\text{с}$.

Результатом усреднения сигнала (5) является дискретное измерение оцениваемой координаты следующего вида [12]:

$$z(t_n) = x(t_n) + s(t_n), \quad (7)$$

где n – номер такта измерений;

$s(t_n)$ – последовательность независимых центрированных гауссовских случайных величин (шум дискретных измерений).

Основной характеристикой такой последовательности, определяющей точность проводимых измерений, служит отношение [11; 12]:

$$S = H / (\tau - \tau_0), \quad (8)$$

где S – дисперсия шума дискретных измерений, м^2 .

Для повышения скорости обработки радиолокационной информации требуемая точность оценки координат сопровождаемой цели $\Sigma_{\text{тр}}$ должна достигаться за однократное обращение к ней [20; 21]. Следовательно, критерием оптимальности управления рассматриваемым режимом будет текущая точность сопровождения, выражаемая в равенстве априорных значений ошибок оценок для n -го и $(n+1)$ -

го тактов измерений (соответственно Σ_n^- и Σ_{n+1}^-) величине $\Sigma_{тр}$:

$$\Sigma_n^- = \Sigma_{n+1}^- = \Sigma_{тр} \quad (9)$$

Уравнения (3–8) соответствуют условиям проведения оптимальной линейной фильтрации случайных процессов [6; 22], что позволяет определить связь между дисперсиями априорной и апостериорной (Σ_n^+) ошибок оценок рассматриваемой координаты цели для n-го такта измерений:

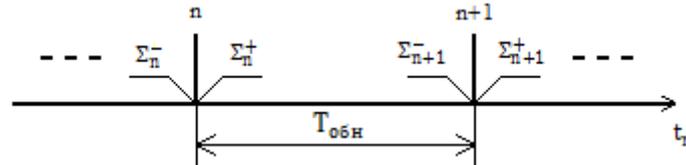


Рис. 2. Дискретное представление процесса измерений

Эволюция величины Σ_{n+1}^- для системы, динамика которой соответствует выражению (3), на интервале между измерениями описывается, согласно [11], линейным дифференциальным уравнением

$$\dot{\Sigma}_{n+1}^- = 2a\Sigma_{n+1}^-(t) + G \quad (11)$$

с начальным условием

$$\Sigma_{n+1}^-(0) = \Sigma_n^+ \quad (12)$$

Нетрудно показать, что решение уравнения (11) равно

$$\Sigma_{n+1}^- = c_1 \exp(2aT_{обн}) - G/(2a), \quad (13)$$

где c_1 – постоянная интегрирования, определяемая из условия (12).

Очевидно, что

$$c_1 = \Sigma_n^+ + G/(2a),$$

поэтому искомая априорная ошибка оценки перед проведением (n+1)-го такта измерений может быть рассчитана в соответствие со следующим выражением:

$$\Sigma_{n+1}^- = \Sigma_n^+ \exp(2aT_{обн}) + (G/(2a))[\exp(2aT_{обн}) - 1]. \quad (14)$$

Предположим [12], что промежуток между измерениями много меньше постоянной времени системы (3). Тогда выражение (14) после некоторых преобразований с использованием формул (9) и (10), а также последующей линеаризации [23] запишется как:

$$\Sigma_{тр} = (T_{обн}/2)(2Sa + G) + \left[\left(T_{обн}^2/4 \right) (2Sa + G)^2 + T_{обн}SG \right]^{1/2} \quad (15)$$

Учитывая соотношения (8) и (10), получим окончательный вид принятого критерия оптимальности управления рассматриваемым режимом МФ РЛС:

$$\Sigma_n^+ = (\Sigma_n^- S) / (\Sigma_n^+ + S). \quad (10)$$

Априорная ошибка оценки перед проведением следующего (n+1)-го такта измерений Σ_{n+1}^- представляет собой величину Σ_n^+ , экстраполированную на время, равное периоду обновления данных по сопровождаемой цели $T_{обн}$ (рис. 2):

$$\Sigma_{тр} = (T_{обн}/2)(2aH/(\tau - \tau_0) + G) + \left[\left(T_{обн}^2/4 \right) (2aH/(\tau - \tau_0) + G)^2 + T_{обн}GH/(\tau - \tau_0) \right]^{1/2} \quad (16)$$

Решая уравнение (16) относительно τ при конкретных значениях уровней шумов в канале измерений РЛС и модели динамики сопровождаемой цели, можно определить численное значение искомой длительности такта измерений координат сопровождаемой цели.

В частном случае при $a=0$ [12] данное решение существенно упрощается:

$$\tau = \tau_0 + GH \left[\Sigma_{тр}^2 / T_{обн} - \Sigma_{тр}G \right]^{-1} \quad (17)$$

Формула (17) выражает зависимость параметра τ , обеспечивающего требуемую точность выдаваемой координатной информации, от степени неопределённости в знании динамики сопровождаемой цели и уровня шумов этих измерений. Очевидно, что при непостоянных уровнях учитываемых шумов указанное выражение описывает закон управления режимом сопровождения МФ РЛС, адаптивный к изменению положения цели в пространстве, т.е. $\tau = \tau(G(x), H(x))$.

Полученный закон адаптивного управления обеспечивает сопровождение целей с равномерной по пространству постоянной точностью. Это означает, что маневрирующие цели должны облучаться чаще, чем цели с прямолинейной траекторией [8]. Найдём период обновления данных $T_{обн}$, соответствующий данному требованию.

В рассматриваемой задаче управления режимом сопровождения (3–8) с критерием качества этого управления вида (16) параметры τ и $T_{обн}$ связаны между собой следующим соотношением [7]:

$$T_{обн} = \tau/E. \quad (18)$$

Здесь E – суммарная величина времени, выделяемого в течение одной секунды на сопровождение одной цели при заданных уровнях шумов [12]:

$$E = \left(G\tau_0 / \Sigma_{\text{тр}} \right) \left[1 + \left(H / (\Sigma_{\text{тр}} \tau_0) \right)^{1/2} \right]^2. \quad (19)$$

С учётом (18) закон адаптивного управления (17) может быть окончательно записан как:

$$\tau = \tau_0 \left[1 - GH / (\Sigma_{\text{тр}}^2 E) \right]^{-1}. \quad (20)$$

Т.о., выражения (18–20) позволяют определить все искомые параметры режима сопровождения МФ РЛС.

Как было указано выше, эффективность управления должна оцениваться путём расчёта соответствующих показателей качества. Применительно к МФ РЛС как информационному средству таким показателем может служить количество одновременно обслуживаемых целей в режиме сопровождения [2; 10].

Оценка количества одновременно обслуживаемых целей в режиме сопровождения МФ РЛС: иллюстративный пример

Используем гипотетическую обстановку типового воздушного налёта и сформулируем требования к МФ РЛС, соответствующие такой обстановке.

Методика расчёта.

Под методикой расчёта количества одновременно обслуживаемых целей в режиме сопровождения МФ РЛС будем понимать совокупность допущений и математических выражений, позволяющих последовательно найти искомые характеристики рассматриваемой РЛС.

Пусть в зоне обзора рассматриваемой МФ РЛС находятся только однотипные цели с ЭПР $\sigma_{\text{ц}} = 0,01 \text{ м}^2$. Примем следующие значения остальных используемых параметров РЛС и цели: $G_a = 40 \text{ дБ}$, $\lambda = 0,03 \text{ м}$, $N_{\text{ш}} = 10 \text{ дБ}$, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/град}$; $T_o = 290 \text{ К}$; $\Sigma_{\text{тр}} = 25 \text{ м}^2$, $T_{\text{обз}} = 1 \text{ с}$, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$; $\Delta f = 1,25 \text{ кГц}$.

Рубеж выдачи информации. Как отмечено выше, закон управления режимом сопровождения МФ РЛС вида (18–20) обеспечивает возможность получения требуемой траекторной информации по сопровождаемой цели за однократное (однотактовое) обращение к ней. Следовательно, рубеж выдачи этой информации R может быть принят равным дальней границе зоны поражения ряда существующих и перспективных огневых средств системы противовоздушной/противоракетной обороны (ПВО/ПРО), т.е. составлять, например, 100 км [24].

Уравнение радиолокации. Выражение (1) связывает между собой характеристики цели и оптимизируемые параметры РЛС при некоторых начальных предположениях. Пусть требуемая точность сопрово-

ждения цели на дальности $R = 100 \text{ км}$ достигается при отношении сигнал/шум $E_c/H = 18 \text{ дБ}$ [10]. Используя логарифмическую форму уравнения радиолокации [2; 5], определим энергию зондирующего сигнала $E_{\text{и}}$ следующим образом:

$$E_{\text{и}} = N_{\text{ш}} + 4R + (E_c/H) - 2G_a - 2\lambda - \sigma_{\text{ц}},$$

где $R = 54 \text{ морских мили} = 100,9 \text{ км}$;

$$\lambda = 4,77 \text{ дБ};$$

$$\sigma_{\text{ц}} = -20 \text{ дБ}.$$

Подставляя эти значения, получаем $E_{\text{и}} = 27,75 \text{ дБ} = 596 \text{ Дж}$.

Тогда стандартная дальность R_0 будет равна:

$$R_0 = 0,25 (2G_a + 2\lambda + \sigma_{\text{ц}} + E_{\text{и}} - N_{\text{ш}})$$

или $R_0 = 21,82 \text{ дБ} = 281,84 \text{ км}$.

Т.к. спектральная плотность шума на стандартной дальности $H_0 = E_{\text{и}}$, то уровень шума на дальности R составит, согласно выражению (2), $H = 9,45 \text{ Дж} = 9,75 \text{ дБ}$.

Для согласования размерности величины H в формуле (2) и в рассматриваемой задаче управления режимом сопровождения (3–8) с критерием качества (16) необходимо учесть взаимную зависимость между законом изменения анализируемой ошибки во времени и её частотным спектром [19]. Для этого представим интенсивность шума измерений в уравнениях (19) и (20) следующей величиной [10; 19]:

$$\frac{R^2}{\Delta f} \frac{\theta^2}{4(E_{\text{и}}/H)},$$

где R измеряется в километрах;

θ – ширина луча диаграммы направленности ФАР МФ РЛС.

Пусть $\theta = 1^\circ$, тогда искомое значение H в (19) и (20) будет равно $0,7024 \text{ м}^2 \cdot \text{с}$.

Интенсивность шума маневрирования. Манёренные возможности цели характеризуют её способность по изменению направления и/или величины своего вектора скорости [6]. Эти изменения в выражении (20) учитываются посредством параметра G , который фактически представляет собой спектральную плотность шума маневрирования [12]:

$$G = \sigma_{\eta}^2 / \Delta f.$$

Величина σ_{η}^2 есть дисперсия интенсивности манёвра g_m , которая численно принимается кратной ускорению свободного падения [6]. Очевидно, что интенсивность манёвра определяет величину возможного изменения скорости цели за данное время. Предположим, что длительность анализируемого временного интервала равна периоду обзора $T_{\text{обз}}$, тогда искомая интенсивность шума манев-

рирования (интенсивность шума модели динамики цели) G может быть найдена следующим образом:

$$G = (g_m T_{обз})^2 / \Delta f. \quad (21)$$

Пусть $g_m = 78,4 \text{ м/с}^2$, тогда $G = 4,92 \text{ м}^2/\text{с}$.

Результат расчёта.

С учётом величины $E = 0,00673$ оптимальные значения искомых параметров режима сопровождения МФ РЛС составят:

- длительность такта измерений $\tau = 0,001681 \text{ с}$;
- период обновления данных по сопровождаемой цели $T_{обн} = 0,25 \text{ с}$.

В этом случае количество одновременно обслуживаемых целей в режиме сопровождения МФ РЛС $N_{ц}$, определяемое как [10]:

$$N_{ц} = T_{обн} / \tau, \quad (22)$$

равно 149.

Сравнительная эффективность адаптивного и фиксированного управления параметрами режима сопровождения МФ РЛС.

Представляет интерес сравнительная оценка эффективности адаптивного и фиксированного управления параметрами режима сопровождения МФ

РЛС, выражающаяся в расчёте количества одновременно обслуживаемых целей при различных способах управления режимом сопровождения МФ РЛС.

Пусть рассматриваемая РЛС использует один из типовых КН сигналов, у которого длительность импульсов равна 0,5 мкс, а частота их повторения зависит от скорости сопровождаемой цели (например, 1000 м/с) [14–16].

Фиксированные параметры рассматриваемого режима, обеспечивающие достижение требуемой точности сопровождения за счёт проведения равноточных и равнодискретных измерений координат обслуживаемой цели, могут быть определены согласно методике, описанной в работе [1]. При этом длительность измерительного участка траектории цели, на котором обеспечивается постоянство отношения сигнал/шум для проведения равноточных измерений, прием равной периоду обзора рассматриваемой МФ РЛС.

На рис. 3 представлено изменение количества одновременно обслуживаемых целей для анализируемых способов управления режимом сопровождения МФ РЛС при разных требованиях к точности выдаваемой координатной информации.

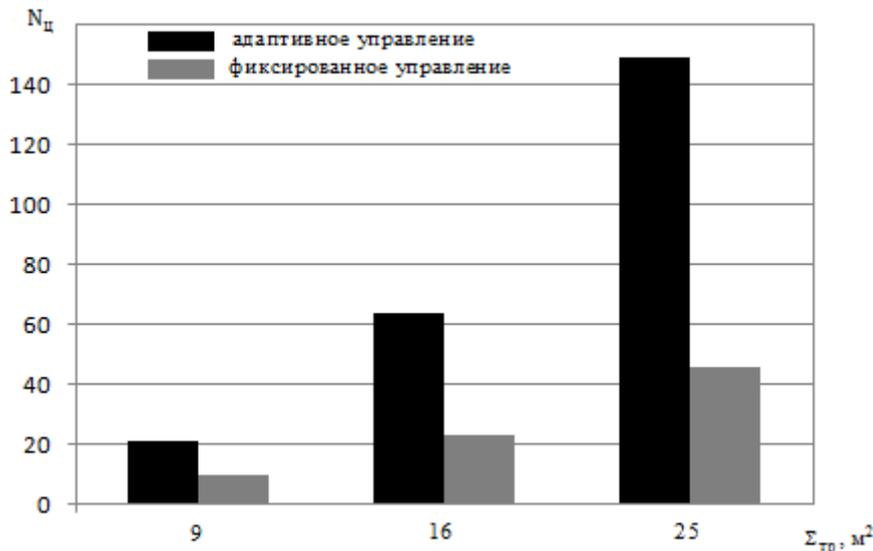


Рис. 3. Количество одновременно сопровождаемых целей при различных видах управления

Анализ полученных результатов показывает, что при одинаковой точности сопровождения количество обслуживаемых целей при традиционном способе управления рассматриваемым режимом МФ РЛС существенно меньше. Кроме того, при снижении требований к точности выдаваемой координатной информации этот выигрыш возрастает.

Заключение

Адаптивное управление режимом сопровождения МФ РЛС, описываемое соотношениями (18–20), является альтернативой традиционным принципам управления, согласно которым длительность такта

измерений координат цели и период его повторения являются постоянными величинами. Рассматриваемый в настоящей статье подход, основанный на положениях линейной теории статистически оптимальных оценок и управления, позволяет решить важную для практики задачу обеспечения требуемой точности сопровождения цели, интенсивно маневрирующей по всей зоне обзора МФ РЛС.

Приведённый иллюстративный пример расчёта количества одновременно обслуживаемых целей при адаптивном и при фиксированном управлении рассматриваемым режимом подтверждает эффективность предложенных решений.

Список літератури

1. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация / С.З. Кузьмин. – Киев: КВЦ, 2000. – 428 с.
2. Этингтон Д.А. Многофункциональные вращающиеся РЛС с электронным сканированием для обзора воздушного пространства / Д.А. Этингтон, П.Дж. Карилас, Дж.Д. Райт // ТИИЭР. – 1985. – Т. 73, № 2. – С. 199-216.
3. Конторов Д.С. Введение в радиолокационную системотехнику / Д.С. Конторов, Ю.С. Голубев-Новожилов. – М.: Советское радио, 1971. – 368 с.
4. Справочник по радиолокации в 4-х т. Под ред. М. Скольника; пер. с англ. под общей ред. К.Н. Трофимова. Том 1. Основы радиолокации. – М.: Советское радио, 1976. – 456 с.
5. Современная радиолокация (анализ, расчёт и проектирование систем): пер. с англ. под ред. Ю.Б. Кобзарева. – М.: Советское радио, 1969. – 644 с.
6. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации / С.З. Кузьмин. – М.: Радио и связь, 1986. – 352 с.
7. Динамическое проектирование систем управления автоматических манёвренных летательных аппаратов / Е.А. Федосов и др. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
8. Ильчук А.Р. Алгоритмы автоматического радиолокационного сопровождения целей в режиме обзора / А.Р. Ильчук, А.И. Канащенков, В.И. Меркулов, О.Ф. Самарин, Г.П. Служкин, А.И. Шуклин // Радиотехника. – 1999. – № 11. – С. 3-21.
9. Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей / А. Фарина, Ф. Студер. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.
10. Бабкин Ю.М. Синтез многофункционального радиолокатора / Ю.М. Бабкин, В.А. Балагуровский. – М.: МЭИ, 2006. – 108 с.
11. Медич Дж. Статистически оптимальные линейные оценки и управление / Дж. Медич; пер. с англ. под ред. А.С. Шаталова. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
12. Симаранов С.Ю. Адаптивное управление параметрами режима сопровождения в многоканальных информационных системах / С.Ю. Симаранов // Техническая кибернетика. – 1989. – №2. – С. 128-131.
13. Гришин И.Ю. Метод адаптивного управления параметрами режима сопровождения многофункционального радиолокационного комплекса / И.Ю. Гришин // Искусственный интеллект. – 2009. – № 4. – С. 520-524.
14. Бобров Д.Ю. Цифровая обработка сигналов в многофункциональных РЛС. Часть 1: Принципы разработки. Преобразование сигнала в цифровую форму / Д.Ю. Бобров, А.П. Доброжанский, Г.В. Зайцев, Ю.В. Маликов, И.Б. Цыпин // Цифровая обработка сигналов. – 2001. – №4. – С. 2-11.
15. Бобров Д.Ю., Доброжанский А.П., Зайцев Г.В., Маликов Ю.В., Цыпин И.Б. Цифровая обработка сигналов в многофункциональных РЛС. Часть 2: Алгоритмы обработки радиолокационных сигналов / / Д.Ю. Бобров, А.П. Доброжанский, Г.В. Зайцев, Ю.В. Маликов, И.Б. Цыпин // Цифровая обработка сигналов, 2002. – №1. – С. 28-39.
16. Зайцев Г.В. Цифровая обработка квазинепрерывных радиолокационных сигналов с использованием весовых функций малой степени / Г.В. Зайцев // Цифровая обработка сигналов. – 2013. – №4. – С. 9-16.
17. Справочник по радиолокации / под ред. М.И. Скольника; пер. с англ. под общей ред. В.С. Вербы. – М.: Техносфера, 2014. – 672 с.
18. Черноусько Ф.Л. Оптимальное управление при случайных возмущениях / Ф.Л. Черноусько, В.Б. Колмановский. – М.: Наука, 1978. – 486 с.
19. Бартон Д. Справочник по радиолокационным измерениям: пер. с англ. под ред. М.М. Вейсбейна / Д. Бартон, Г. Вард. – М.: Советское радио, 1976. – 392 с.
20. Куликов А. Большие проблемы малой дальности / А. Куликов // Воздушно-космическая оборона. – 2009. – № 6 (49). – С. 23-30.
21. Калинин М. Состояние и перспективы развития американских наземных РЛС дальнего обнаружения воздушных целей / М. Калинин, А. Даландин // Зарубежное военное обозрение. – 2016. – №1. – С. 69-74.
22. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах: под ред. К.Т. Леондеса. – М.: Мир, 1980. – 388 с.
23. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1981. – 780 с.
24. Зенитные ракетные комплексы ПВО Сухопутных войск. Часть 1 // Техника и вооружение. – 2003. – №6. – С. 29-40.

Поступила в редколлегию 6.01.2017

Рецензент: д-р техн. наук проф. Г.В. Худов, Харьковский национальный университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

АДАПТИВНЕ УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМУ СУПРОВОДЖЕННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОЇ РЛС

О.Л. Смірнов, О.М. Ставицький, О.А. Наконечний

Розглянуто принцип управління параметрами режиму супроводження багатофункціональної РЛС, що ґрунтується на врахуванні зміни рівнів шумів у каналі вимірювань РЛС і моделі динаміки супроводжуваної цілі, адаптивний до її переміщення в просторі. Наведено ілюстративний приклад розрахунку кількості одночасно супроводжувальних цілей при традиційному і запропонованому підходах до управління режимом, що аналізується. Підтверджено ефективність отриманих рішень.

Ключові слова: багатофункціональна РЛС, режим супроводження, адаптивне управління.

ADAPTIVE CONTROL OF TRACKING MODE PARAMETERS OF A MULTI-FUNCTION RADAR

O.L. Smirnov, O.N. Stavitskiy, A.A. Nakonechniy

The article focuses on the control strategy of tracking mode parameters of a multi-function radar, which is based on considering the change of noise levels in the radar measuring channel as well as the **dynamic model** of the target being tracked and it is adaptive to its motion in space. An illustrative example for calculating the number of targets that can be tracked simultaneously is given using both the traditional and proposed approaches to control the mode under consideration. The efficiency of the obtained solutions has been confirmed.

Keywords: multi-function radar, tracking mode, adaptive control.