

УДК 623.681.93

О.Л. Смирнов, О.Н. Ставицкий, Е.А. Рябоконт, Д.В. Кныш

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ СОПРОВОЖДЕНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РЛС

Описан новый подход к управлению режимом сопровождения многофункциональной РЛС, основанный на одновременном учёте (посредством нелинейной схемы компромиссов) взаимно противоречивых требований по обеспечению заданной точности сопровождения цели, а также минимизации расхода энергетических и временных ресурсов рассматриваемой РЛС. Показано, что синтезированный на его основе метод оптимального управления указанным режимом является выгодной, по критерию эффективности многофункциональной РЛС, альтернативой традиционным методам управления, каждый из которых по отдельности минимизирует ошибки сопровождения цели, энергетические или временные затраты РЛС.

**Ключевые слова:** многофункциональная РЛС, режим сопровождения, показатель качества управления, нелинейная схема компромиссов, метод управления.

### Вступление

**Постановка проблемы.** Рассмотрим процесс управления режимом сопровождения многофункциональной радиолокационной станции (МФ РЛС) зенитного ракетного комплекса (ЗРК), результатом которого является достижение требуемой точности оценки координат сопровождаемой цели [1].

В общем случае под управлением режимом сопровождения МФ РЛС понимается целенаправленное изменение его параметров для обеспечения заданных характеристик выдаваемой информации. Такими параметрами являются частота повторения зондирующих импульсов  $F_{\text{и}}$ , количество импульсов в пачке  $N_{\text{и}}$ , а также период обновления данных по сопровождаемой цели  $T_{\text{обн}}$ . Эти изменения могут осуществляться только в пределах выделенных энергетических и временных ресурсов МФ РЛС [1, 2].

Энергетические ресурсы МФ РЛС, расходуемые на сопровождение цели, определяются количеством энергии  $E_{\text{обл}}$ , излучаемой за время её облучения  $T_{\text{обл}}$  со средней мощностью  $P_{\text{ср}}$  [1, 3]:

$$E_{\text{и а в}} = P_{\text{пд}} T_{\text{и а в}}, \quad (1)$$

а временные – длительностью облучения цели [3]:

$$T_{\text{и а в}} = N_{\text{е}} / F_{\text{е}}. \quad (2)$$

Большинство из существующих методов управления режимом сопровождения (см., например, [1 – 4]), по отдельности минимизируют ошибки сопровождения цели, затраты энергии  $E_{\text{обл}}$  или времени  $T_{\text{обл}}$ . Однако, как показано в работах [5, 6], такой подход в определённых условиях приводит к снижению эффективности как собственно МФ РЛС, так и всего ЗРК, информационной подсистемой которого она является.

Введём вместо совокупности изменяемых параметров режима сопровождения единый управляемый параметр – нормированный коэффициент энер-

гопотребления (КЭП)  $\xi_{\text{н}}$ . Он показывает, какая доля общего ресурса МФ РЛС, выделенного режиму сопровождения, расходуется на обслуживание цели в течение периода обзора пространства длительностью  $T_{\text{обз}}$  [7]:

$$\xi_{\text{н}} = E_{\text{и а в}} / E = T_{\text{и а в}} / T_{\text{и а в}}, \quad (3)$$

где  $E$  – энергия, излученная МФ РЛС за время  $T_{\text{обз}}$ .

Использование КЭП  $\xi_{\text{н}}$  позволяет перейти от минимизации частных показателей качества управления режимом сопровождения, оптимизирующих расход энергетических и временных ресурсов МФ РЛС при достижении требуемой точности оценки координат цели, к поиску некоторого компромиссного распределения этих ресурсов на рассматриваемом временном интервале. Для этого необходимо осуществить скалярную свертку указанных частных показателей, например, по рассмотренной в статье [8] нелинейной схеме компромиссов (НСК).

На основе НСК в работах [5, 6] получено решение задачи управления данным режимом МФ РЛС и проведена оценка его эффективности для случая сопровождения одной цели по дальности. Однако систематизированное рассмотрение вопросов применения НСК для оптимизации управления режимом сопровождения МФ РЛС в настоящее время отсутствует, что и составляет суть обсуждаемой в данной статье проблемы.

**Анализ последних исследований и публикаций.** К публикациям последнего времени, описывающим решение задачи оптимального управления режимом сопровождения посредством НСК, кроме уже упомянутых работ [5, 6], относится также являющаяся их продолжением статья [9].

В них последовательно сформирован с использованием НСК обобщённый показатель качества управления режимом сопровождения МФ РЛС,

оценена его эффективность по сравнению с одним из традиционных показателей, а также синтезирован метод управления рассматриваемым режимом как совокупность математических выражений, описывающих целенаправленное изменение его параметров и обеспечивающих оптимум принятого обобщённого показателя качества.

Вместе с тем, как было отмечено выше, отдельные результаты, приведенные в этих публикациях, не составляют целостного описания применения НСК для управления режимом сопровождения МФ РЛС. Данное обстоятельство и обуславливает актуальность настоящей работы.

**Целью статьи** является систематизированное изложение нового подхода к построению методов оптимального управления режимом сопровождения МФ РЛС, основанного на одновременном учёте посредством НСК взаимно противоречивых требований по обеспечению заданной точности сопровождения цели, а также минимизации расхода энергетических и временных ресурсов РЛС.

### Изложение основного материала

При работе МФ РЛС в режиме сопровождения процесс обслуживания цели заключается в её регулярном облучении с частотой  $1/T_{обн}$  пачкой из  $N_n$  импульсов [10]. На практике обновление данных по сопровождаемой цели обычно происходит один раз за период обзора пространства [3], поэтому значения  $T_{обн}$  и  $T_{обз}$  будут совпадать (рис. 1):

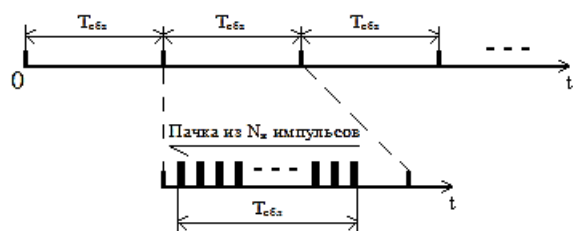


Рис. 1. Временные соотношения исследуемого процесса

В этом случае, как следует из анализа соотношения (3), изменение величины КЭП  $\xi_n$  эквивалентно реализации принципа т.н. “активного сопровождения”, заключающегося в применении переменных значений темпа обновления данных по сопровождаемой цели и времени её облучения. Очевидно, что для различных типов целей данные параметры режима сопровождения также должны различаться. Это обеспечивается объединением сопровождаемых целей по определённым характеристикам в группы, для каждой из которых устанавливаются свои значения темпа обновления данных и времени облучения, изменяющиеся, например, при просмотре различных секторов зоны обзора МФ РЛС [1 – 4].

Основной характеристикой МФ РЛС, влияющей на точность сопровождения цели, является

отношение сигнал/шум. Его величина для одного зондирующего импульса  $q_1$  может быть рассчитана следующим образом [11]:

$$q_1 = \frac{G_a^2 \lambda^2 \sigma_{\delta} \dot{A}_{\dot{\epsilon}}}{(4\pi)^3 k T_o R^4}, \quad (4)$$

где  $G_a$  – коэффициент усиления приемо-передающей антенны РЛС;

$\lambda$  – длина волны излучения РЛС;

$\sigma_{\delta}$  – эффективная поверхность рассеивания (ЭПР) цели;

$E_n$  – энергия зондирующего импульса;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T_o$  – опорная температура;

$R$  – дальность до сопровождаемой цели.

При когерентном накоплении отраженных от цели сигналов, количество которых  $N_n$  находится на этапе захвата цели на сопровождение [12], результирующее отношение сигнал/шум  $q_N$  будет равно:

$$q_N = q_1 N_n. \quad (5)$$

Соответствующая дальность, на которой обеспечивается требуемая величина отношения  $q_N$ , определяется как:

$$R^4 = \frac{G_a^2 \lambda^2 \sigma_{\delta} \dot{A}_{\dot{\epsilon}} N_n}{(4\pi)^3 k T_o q_N}. \quad (6)$$

Объединяя выражения (2) и (6) с известной зависимостью энергии зондирующего импульса от средней мощности излучения РЛС  $P_{cp}$  [10], получим следующее соотношение для расчёта длительности облучения цели:

$$T_{i \dot{a} \dot{\epsilon}} = \frac{(4\pi)^3 k T_o q_N R^4}{G_a^2 \lambda^2 \sigma_{\delta} P_{пд}}. \quad (7)$$

Как показано в работе [5], при относительно постоянной (в течение некоторого интервала наблюдения) величине параметра  $q_N$  количество периодов обзора  $n$ , необходимых для достижения требуемого значения  $\sigma_{\delta\delta}^2$  дисперсии сглаженной оценки координат линейной траектории сопровождаемой цели  $\sigma_n^2$ , равно:

$$n = 2 / K_n - 0,5 + \sqrt{(0,5 - 2 / K_n)^2 - 2 / K_n}, \quad (8)$$

где  $K_n$  – отношение  $\sigma_{\delta\delta}^2$  к дисперсии ошибки оценивания координат после проведения  $N_n$ -кратного зондирования за один период обзора.

Данный интервал наблюдения представляет собой т.н. цикл работы МФ РЛС по сопровождаемой цели длительностью  $nT_{обз}$ , характерной особенностью которого является неизменность параметров реализуемого режима, определяемых при захвате цели на сопровождение [12]. При этом выражения (1) – (8) описывают опорное (т.е. обеспечивающее достижение заданной величины дисперсии ошибки

оценивания за соответствующее время) распределение энергетических и временных ресурсов рассматриваемой МФ РЛС в режиме сопровождения [5]. Например, при численных значениях параметров цели и РЛС, приведенных в работе [5], такое распределение для одного периода обзора при сопровождении цели по дальности имеет вид:  $T_{обл}=0,003253$  с,  $E_{обл}=2,17$  Дж.

Очевидно, что изменение опорного распределения происходит при соответствующем изменении приоритета одной из целевых функций управления РЛС [13].

Таковыми целевыми функциями в данном случае являются увеличение рубежа выдачи информации требуемого качества по сопровождаемой цели и повышение пропускной способности МФ РЛС. Первая из них достигается путем уменьшения длительности сопровождения цели (т.е. расхода временных ресурсов МФ РЛС), вторая – минимизацией затрат её энергетических ресурсов [13].

На рис. 2 показано изменение расхода энергетических ресурсов МФ РЛС за один период обзора  $\Delta E_{\xi_n}$  по сравнению с опорным распределением при различных значениях требуемой точности и длительности сопровождения цели.

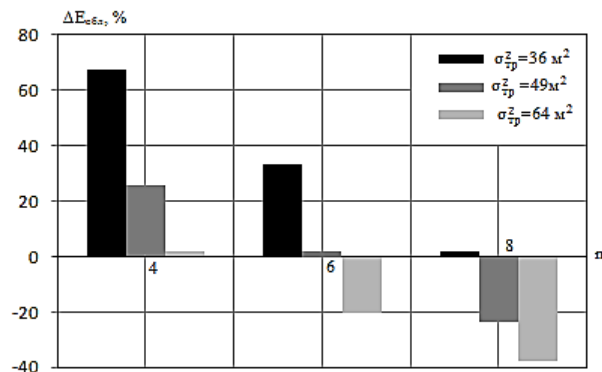


Рис.2. Изменение расхода энергетических ресурсов МФ РЛС за один период обзора при различных значениях требуемой точности и длительности сопровождения цели

Данный рисунок наглядно иллюстрирует невозможность одновременного снижения расхода энергетических и временных ресурсов РЛС при обеспечении заданной точности оценки координат сопровождаемой цели, что свидетельствует о взаимной противоречивости традиционно применяемых показателей качества управления режимом сопровождения МФ РЛС.

Как было отмечено ранее, одним из путей решения этого противоречия является скалярная свёртка частных показателей по НСК [8]. Используя выражение (3), представим рассматриваемые показатели, описывающие затраты энергетических и временных ресурсов МФ РЛС в режиме сопровождения, в следующем виде:

$$E_{\hat{\xi}_n} = E \xi_n, \tag{9}$$

$$T_{\hat{\xi}_n} = T_{\hat{\xi}_n} \xi_n. \tag{10}$$

Обеспечиваемая при этом величина дисперсии ошибки оценивания дальности до цели при  $N_n$ -кратном зондировании за один период обзора находится как [7, 13]:

$$\sigma_R^2 = C_n / \xi_n. \tag{11}$$

В последнем выражении параметр  $C_c$  представляет собой коэффициент, связывающий ошибку оценки дальности с долей энергетики МФ РЛС  $\xi_n$ , выделенной на обслуживание цели. Он может быть получен в результате совместного решения основного уравнения радиолокации и уравнения потенциально достижимой точности определения радиолокатором соответствующей координаты цели [10, 11]:

$$C_n = \frac{(4\pi)^2 k T_0 n^2 \tau_n^2 R^4}{G_a^2 \lambda^2 \sigma_0 P_{\text{нб}} \dot{O}_{\hat{\xi}_n}}, \tag{12}$$

где  $c$  – скорость света;

$\tau_n$  – длительность зондирующего импульса.

Аксиоматика НСК предполагает неотрицательность и ограниченность сворачиваемых частных показателей качества управления. Очевидно, что показатели вида (9) – (11) удовлетворяют данному условию. Поэтому обобщённый показатель качества управления режимом сопровождения МФ РЛС будет иметь следующий вид [5, 8]:

$$J_0 = \sigma_0^2 (\sigma_0^2 - C_c / \xi_c)^{-1} + 2(1 - \xi_c)^{-1}, \tag{13}$$

где  $\sigma_0^2$  – дисперсия ошибки оценивания дальности до сопровождаемой цели при однократном зондировании.

Минимум показателя (13) достигается при

$$\xi_n = \frac{C_c + \sqrt{2C_n^2 / \sigma_0^2 + 2C_c \sigma_0^2 - 4C_n^2}}{2\sigma_0^2 - C_c}. \tag{14}$$

ЭКП  $\xi_n$  вида (14) определяет оптимальное (в смысле обобщенного показателя качества  $J_0$ ) распределение энергетических и временных ресурсов МФ РЛС на один период обзора. Однако вопрос о целесообразности его применения может быть решён только после проведения сравнительной оценки эффективности данного показателя и показателей, традиционно используемых для оптимизации режима сопровождения.

Эффективность применения того или иного показателя качества управления режимом сопровождения МФ РЛС не зависит от его значения, а определяется как разность между величиной выигрыша  $G$ , который обеспечивает данная МФ РЛС самому ЗРК, и затратами на его достижение  $C$  [10].

Пусть МФ РЛС наводит по одной зенитной управляемой ракете (ЗУР) на  $N_n$  однотипных целей из общего количества находящихся в её зоне обзора

$N_{\delta}^{\hat{a}\hat{c}}$  целей. В этом случае выражение для расчета  $G$  при сопровождении цели по дальности записывается следующим образом:

$$G = (N_{\delta} / N_{\delta}^{\hat{a}\hat{c}}) N_{\delta}^0 \exp(-\sigma_R^2 / l_0^2), \quad (15)$$

где  $N_{\delta}^0$  – пороговая величина пропускной способности МФ РЛС;

$l_0$  – параметр закона поражения, который рассчитывается для опорного значения КЭП согласно соотношению  $l_0 = \sqrt{-C_{\hat{n}} / (\xi_{\hat{n}} \ln 0,6)}$  [11].

Выигрыш (15) достигается ценой некоторых энергетических и временных затрат  $C$ , которые при отсутствии ложных тревог могут быть определены как

$$C = \xi_{\hat{n}} (N_{\delta} / N_{\delta}^{\hat{a}\hat{c}}) N_{\delta}^0. \quad (16)$$

Тогда эффективность  $\Delta$  с учётом (11) имеет вид:

$$\Delta = \left( N_{\delta} / N_{\delta}^{\hat{a}\hat{c}} \right) N_{\delta}^0 \left( \exp(-C_{\hat{n}} / \xi_{\hat{n}} l_0^2) - \xi_{\hat{n}} \right). \quad (17)$$

Соотношение (17) выражает зависимость между величиной эффективности МФ РЛС и КЭП режима сопровождения  $\xi_{\hat{n}}$ , обеспечивающим минимизацию того показателя качества, в соответствии с которым осуществляется управление режимом сопровождения МФ РЛС в данной конкретной ситуации.

Пусть  $N_{\hat{n}}=4$  цели,  $N_{\delta}^{\hat{a}\hat{c}}=24$  цели и  $N_{\delta}^0=10$  целей. В этом случае эффективность рассматриваемой МФ РЛС, рассчитанная с использованием соотношений (15) – (17), при замене опорного распределения её энергетических и временных ресурсов на оптимальное (т.е. полученное с использованием НСК) возрастает на 53,5 %.

На рис. 3 показано изменение эффективности  $\Delta \mathcal{E}$  МФ РЛС за счёт применения оптимального управления рассматриваемым режимом её работы при различных требованиях к точности и времени сопровождения цели.

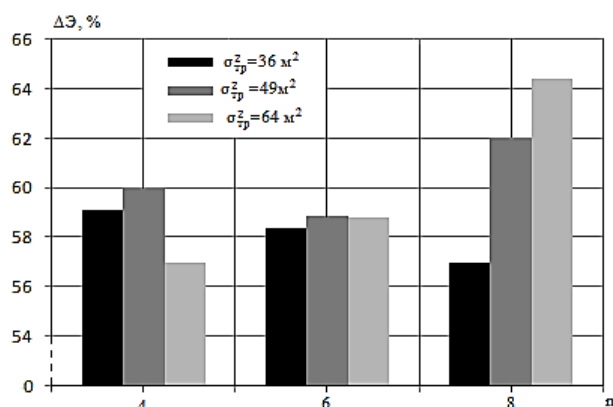


Рис. 3. Увеличение эффективности МФ РЛС при различных значениях требуемой точности и времени сопровождения цели

Из анализа этих данных следует, что оптимальное управление режимом сопровождения, полученное с использованием НСК, позволяет существенно повысить эффективность МФ РЛС как информационной подсистемы ЗРК.

Соответствующий метод оптимального управления режимом сопровождения МФ РЛС как последовательность математических операций, описывающих целенаправленное изменение параметров этого режима и обеспечивающих минимум обобщённого показателя качества  $J_0$ , будет иметь следующий вид.

Для каждой  $i$ -й цели, взятой на сопровождение на дальности  $R_i$ , рассчитывается отношение сигнал/шум  $q_{1i}$  для одного зондирующего импульса согласно выражению (4).

Определяется соответствующая дисперсия ошибки оценивания дальности до сопровождаемой цели при однократном зондировании  $\sigma_{0i}^2$  [5]:

$$\sigma_{0i}^2 = \frac{c^2 \tau_e^2}{4\pi q_{1i}}. \quad (18)$$

Находится параметр  $C_{ci}$  в соответствии с выражением (12).

Вычисляется КЭП  $i$ -й цели  $\xi_{\hat{n}i}$  по формуле (14).

Проверяется условие соблюдения баланса энергетических и временных ресурсов МФ РЛС при многорежимной работе [7, 13]:

$$\sum_{i=1}^{N_{\delta}^{\hat{n}}} \xi_{\hat{n}i} \leq 1 - \sum_{k=1}^{K-1} \xi_k, \quad (19)$$

где  $N_{\delta}^{\hat{n}} \leq N_{\delta}^0$  – количество целей, одновременно обслуживаемых МФ РЛС в режиме сопровождения;  $K$  – общее количество режимов работы МФ РЛС;  $\xi_k$  – КЭП  $k$ -го функционального режима МФ РЛС (в рассматриваемом случае – режимов обнаружения новых целей и наведения ЗУР), которые предварительно определяются при решении задачи распределения ресурсов МФ РЛС между различными режимами [1].

При невыполнении неравенства (19) происходит корректировка этого распределения, например, за счёт сброса с сопровождения наименее приоритетной из ряда опасных целей [11].

Согласно выражениям (9) и (10) находятся энергетические ( $E_{обл}$ ) и временные ( $T_{обл}$ ) ресурсы МФ РЛС, расходуемые на сопровождение  $i$ -й цели.

С использованием соотношений (1) и (2) для каждой цели назначаются соответствующие параметры режима сопровождения.

## Выводы

Управление режимом сопровождения МФ РЛС путём минимизации построенного по НСК обоб-

ценного показателя качества рассмотрено в настоящей статье как выгодная по критерию эффективности МФ РЛС, являющейся информационной подсистемой ЗРК, альтернатива традиционным методам управления, которые по отдельности минимизируют ошибки сопровождения цели, расход энергетических или временных ресурсов данной РЛС. Для подтверждения этого тезиса последовательно описан процесс сопровождения цели как объект управления, на иллюстративном примере показана взаимная противоречивость традиционно применяемых показателей качества этого управления, проведена количественная оценка эффективности использования предлагаемого показателя и, наконец, на основе полученных результатов синтезирован новый метод оптимального управления режимом сопровождения МФ РЛС.

### Список литературы

1. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация / С.З. Кузьмин. – К.: КВЦ, 2000. – 428 с.
2. Гузь В.И. Адаптивное управление распределением энергетического и временного ресурса РЛС с фазированной антенной решеткой / В.И. Гузь, А.В. Бутырин, В.П. Липатов, Т.В. Барингольц // Радиотехника. – 2007. – № 2. – С. 3-14.
3. 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.
4. 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. Слукин, А.И. Шуклин // Радиотехника. – 1999. – № 11. – С. 3-21.
5. Смирнов О.Л. Выбор показателя качества управления режимом сопровождения многофункциональной РЛС / О.Л. Смирнов, О.Н. Ставицкий, Е.А. Рябоконт, В.Н. Чепига // Збірник наукових праць ХУ ПС. – Х.: ХУ ПС, 2009. – Вип. 2(20). – С. 38-41.
6. Смирнов О.Л. Эффективность нелинейной схемы компромиссов при управлении режимом сопровождения многофункциональной РЛС / О.Л. Смирнов, О.Н. Ставицкий, Е.А. Рябоконт // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Х.: ХУ ПС, 2009. – № 2(2). – С. 59-61.
7. Решетник В.М. Оптимальное распределение энергетических ресурсов многофункциональной РЛС между функциональными режимами / В.М. Решетник, О.Л. Смирнов, С.Н. Пискунов, Е.В. Титова // АСУ и приборы автоматики. – Х., ХГТУРЭ, 1998. – Вып. 107. – С. 42-45.
8. Воронин А.Н. О формализации выбора схемы компромиссов в задачах многокритериальной оптимизации / А.Н. Воронин // Техническая кибернетика. – 1984. – № 2. – С. 37-45.
9. Смирнов О.Л. Метод оптимального управления режимом сопровождения многофункциональной РЛС / О.Л. Смирнов, О.Н. Ставицкий, Е.А. Рябоконт, В.Н. Чепига // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ДП «ЦНДІ навігації і управління», 2010. – Вип. 1(13). – С. 58-61.
10. Конторов Д.С. Введение в радиолокационную системотехнику / Д.С. Конторов, Ю.С. Голубев-Новожилов. – М.: Сов. радио, 1971. – 368 с.
11. Вишнякова Л.В. Система автоматизированного формирования облика зенитных ракетных комплексов / Л.В. Вишнякова, В.И. Кухтенко // Техническая кибернетика. – 1993. – № 6. – С. 137-185.
12. Саврасов Ю.С. Алгоритмы и программы в радиолокации / Ю.С. Саврасов. – М.: Радио и связь, 1985. – 216 с.
13. Можар М.К. Проблемы управления зенитными ракетными комплексами / М.К. Можар, В.М. Решетник, И.Ю. Гришин // Наука и оборона. – 1995. – № 2. – С. 14-21.

Поступила в редколлегию 5.04.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Е.Л. Казаков, Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков.

### ОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ РЕЖИМОМ СУПРОВОДЖЕННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОЇ РЛС

О.Л. Смирнов, О.М. Ставицкий, Є.О. Рябоконт, Д.В. Книш

Описаний новий підхід до управління режимом супроводження багатофункціональної РЛС, що ґрунтується на одночасному врахуванні (за допомогою нелінійної схеми компромісів) вимог, що суперечать одна одній по забезпеченню заданої точності супроводження цілі, а також мінімізації витрати енергетичних та часових ресурсів РЛС, що розглядається. Показано, що синтезований на його ґрунті метод оптимального управління вказаним режимом є вигідною, за критерієм ефективності багатофункціональної РЛС, альтернативою традиційним методам управління, кожний з яких окремо зводить до мінімуму помилки супроводження цілі, енергетичні або часові затрати РЛС.

**Ключові слова:** багатофункціональна РЛС, режим супроводження, показник якості управління, нелінійна схема компромісів, метод управління.

### OPTIMAL TRACKING MODE CONTROL OF MULTIFUNCTIONAL RADAR STATION

O.L. Smirnov, O.M. Stavitskiy, E.O. Ryabokon, D.V. Knysh

The new approach to multifunction radar station accompaniment mode control is described. It is based on simultaneous taking into account (by means of nonlinear compromise scheme) mutually contradictory requirements of target accompaniment given accuracy support, and the concerned radar station power and time consumption minimization. It is shown, that the given mode optimal control method synthesized on its basis is a profitable, in respect to multifunction radar station efficiency, alternative to traditional control methods. Each of them separately minimize target accompaniment errors, radar station power or time consumption.

**Keywords:** multifunctional radar station, tracking mode, control quality index, nonlinear compromise scheme, control method.