

Адаптивное управление параметрами режима сопровождения многофункционального радиолокационного комплекса в условиях нестационарности канала измерения

И. Ю. Гришин, Р. Р. Тимиргалеева

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Москва, Россия

igugri@gmail.com

Аннотация. Работа посвящена проблеме оптимизации управления функционированием многофункционального радиолокационного комплекса в режиме сопровождения множества объектов при наличии нестационарностей в канале измерения. При этом обработка информации о сопровождаемых объектах осуществляется с помощью рекуррентного фильтра. Предложен метод адаптивного управления темпом локации сопровождаемых объектов в зависимости от степени неопределенности в знании динамики движения, уровня шумов в канале измерения, а также временного ресурса, выделенного на сопровождение.

Ключевые слова: радиолокационная система; адаптивное управление; нестационарность измерительного канала; устойчивое сопровождение объекта

1. ВВЕДЕНИЕ

Радиолокационная система обладает ограниченными возможностями по получению и преобразованию информации о потоках объектов (целей). Эти ограничения определяются в основном конечными значениями ее энергетических и информационных ресурсов. Существенным резервом повышения эффективности работы многофункционального радиолокационного комплекса (МФ РЛК) является оптимизация управления ее параметрами при реализации каждого функционального режима [1]. Применительно к режиму сопровождения целью управления обычно служит повышение точности оценки координат сопровождаемых объектов, а также снижение временных и энергетических затрат, что, в свою очередь, приводит к повышению пропускной способности РЛК.

В ряде работ [2–5] рассмотрены основные подходы к организации сопровождения объектов, которые учитывают нестационарность модели движения объектов или статистических характеристик канала измерения координат, однако комплексного решения проблемы авторами предложено не было.

В работе [6] рассмотрена задача управления ресурсами в многопозиционных радиолокационных системах. На

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №19-29-06081

основе иерархической системы управления авторы рассматривают уровень управления, на котором осуществляется перераспределение активных радиолокаторов, в зависимости от рабочей ситуации в зоне ответственности системы, и предлагают неоптимальное решение задачи оптимизации для минимизации использования радиолокационного ресурса.

Применению многопозиционной системы для обнаружения космического мусора посвящена работа [7], в которой авторы предлагают решать указанную задачу путем применения расширенных антенных полей. Следует отметить, что авторами опубликована серия статей, направленных на решение рассматриваемой проблемы, однако в них изучены проблемы обнаружения частиц космического мусора, обладающих малыми ЭПР (эффективными поверхностями рассеивания), при этом вопросам управления энергетическими ресурсами комплекса уделено недостаточно внимания.

Вопросам управления функционированием радиолокационного комплекса посвящен ряд работ авторов [3–5, 8], в которых были получены результаты, позволяющие синтезировать алгоритмы управления такими, базирующиеся на оптимальных методах, однако их применение в системах управления реального времени очень затруднено поскольку они требуют значительных вычислительных ресурсов, которыми управляющие ЭВМ обычно не обладают.

В фундаментальной работе [9], а также ей предшествующей [10], рассмотрены все основные проблемы, которые возникли при переходе к цифровым методам радиолокации (первичная, вторичная и третичная обработка информации, управление, передача информации и т.п.), а также направления их решения. Однако здесь больше уделено вниманию теоретическим подходам к решению фундаментальных проблем цифровой радиолокации, а направлениям практического применения предложенных методов уделено недостаточно внимания.

Вопросам анализа существующих подходов к построению алгоритмов управления радиолокационными

ресурсами уделено внимание в [11], однако следует отметить, что случаи нестационарности в каналах измерения почти не рассматривались авторами.

Целью данной работы является разработка метода адаптивного управления темпом локации сопровождаемых объектов в зависимости от степени неопределенности в знании динамики движения, уровня шумов в канале измерения, а также временного ресурса, выделенного на сопровождение.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве параметров режима сопровождения примем длительность такта измерения положения i -той сопровождаемой цели τ_i и частоту повторения этих тактов F .

Распределение времени работы МФ РЛК при сопровождении N целей с одновременной реализацией одного или нескольких других функциональных режимов представимо в виде:

$$\sum_{i=1}^N E_i = E_c \quad (1)$$

где E_i ресурс времени (т.е. часть времени в течение интервала $[0, T]$), выделяемый на измерение координат i -той сопровождаемой цели; E_c – ресурс времени РЛС, выделяемый на реализацию функционального режима сопровождения.

Ресурс времени E_i состоит из тактов измерения положения i -той сопровождаемой цели длительностью τ_i , которые повторяются с частотой F_i :

$$E_i = \tau_i F_i \quad (2)$$

Будем полагать, что процесс изменения измеряемой координаты сопровождаемой цели описывается линейным стохастическим дифференциальным уравнением вида:

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

где $x(t)$ – измеряемая координата; $\omega(t)$ – белый центрированный гауссовский шум с дисперсией σ_0^2 .

При реализации процесса сопровождения проводятся измерения фазовой координаты x , уравнение измерений представимо в виде:

$$z(t) = x(t) + v(t), \quad (4)$$

где $v(t)$ – белый центрированный гауссовский шум с дисперсией σ_v^2 .

Условимся, что основные временные соотношения исследуемого процесса таковы, что интервал времени длительностью τ_T является тактом измерения, а величина T_* определяется через частоту повторения тактов измерения как $T_* = 1/F$.

В результате измерения в конце такта образуется дискретное измерение фазовой переменной, которое запишем в виде:

$$z_n = x_n + \Delta z_n, \quad (5)$$

где n – номер такта измерения; Δz_n – белый центрированный гауссовский шум с дисперсией $\sigma_z^2 = \sigma_v^2 / \Delta\tau$, $\Delta\tau = \tau_T - \tau_0$, а величина τ_0 является непроизводительными (с точки зрения процесса определения параметров положения сопровождаемого объекта) потерями в такте измерения.

Традиционным способом управления РЛК в режиме сопровождения является априорный расчет τ_i и F_i (а, следовательно, и E_i), удовлетворяющих принятым критериям качества управления, и сопровождение объекта в зоне ответственности РЛК с выбранными постоянными значениями τ_i и F_i . Такой способ функционирования неэффективен, так как оптимальное соотношение между длительностью тактов τ_i и частотой их повторения F_i при фиксированном значении E_i зависит от соотношения между уровнем шумов в канале измерений и динамическими характеристиками цели (уровнем шумов в модели объекта), которые могут существенно меняться по мере движения объекта в зоне обзора РЛК. Действительно, при больших уровнях шумов в канале измерений ошибки сопровождения можно уменьшить, увеличивая длительность излучаемых сигналов (или, что то же самое, увеличивая длительность такта измерения). С другой стороны, при больших уровнях шумов в модели сопровождаемой цели уменьшение ошибки сопровождения может быть достигнуто за счет проведения более частых измерений [1] (т.е. путем повышения частоты повторения тактов за счет уменьшения их длительности). Кроме того, выбор постоянных значений τ_i и F_i означает применение постоянного темпа локации сопровождаемых объектов, что в ряде случаев не обеспечивает полного использования информационных возможностей РЛК.

Таким образом, задача состоит в выборе оптимальных значений длительности такта измерения τ_T и частоты повторения F , связанных между собой условием (2) (здесь и далее индексы « i » для сокращения записи опущены). Критерием качества управления будем считать величину экстраполированной ошибки оценки положения сопровождаемой цели.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Уравнение динамики системы (3) и уравнение дискретных измерений (5) соответствуют условиям проведения оптимальной линейной фильтрации случайных процессов [6]. Следовательно, связь между дисперсиями ошибок априорной и апостериорной оценок в n -том такте измерения определяется как:

$$\Sigma_n^+ = (1 - K_n) \Sigma_n^- , \quad (6)$$

где Σ_n^+ – дисперсия ошибки апостериорной оценки фазовой координаты; Σ_n^- – дисперсия ошибки априорной оценки; K_n – коэффициент усиления фильтра, причем

$$K_n = \Sigma_n^- [\Sigma_n^- + \sigma_z^2]^{-1} , \quad (7)$$

Подставив (7) в (6), получим зависимость апостериорной ошибки от ее априорного значения и дисперсии шума дискретных измерений:

$$\Sigma_n^+ = (\Sigma_n^- \sigma_z^2) / (\Sigma_n^- + \sigma_z^2) . \quad (8)$$

Выбор оптимального темпа локации сводится к выбору момента проведения следующего измерения. Примем за время экстраполяции интервал между измерениями T . Тогда дисперсия экстраполированной оценки будет равна дисперсии априорной ошибки оценки перед проведением $(n+1)$ -го измерения Σ_{n+1}^- , которая, в свою очередь, для системы (3), (5) рассчитывается как [7]:

$$\Sigma_{n+1}^- = \Sigma_n^+ \exp(2aT) + (\sigma_0^2/2a) [\exp(2aT) - 1] \quad (9)$$

В качестве дополнительного условия используем требование устойчивости сопровождения объектов (стационарности режима сопровождения), т.е. требование равенства величины дисперсии априорных ошибок перед каждым измерением:

$$\Sigma_n^- = \Sigma_{n+1}^- = \Sigma_y . \quad (10)$$

С учетом (8) и (9) может быть найдено решение уравнения (10) относительно Σ_y и записано выражение для критерия качества сопровождения в виде

$$\begin{aligned} \Sigma_y = 0.5 [& \exp(2a/F) - 1] [\sigma_z^2 + \sigma_0^2/2a] + \\ & + [\exp(2a/F) - 1]^2 [\sigma_z^2 + \sigma_0^2/2a]^2 + \\ & + (2\sigma_z^2\sigma_0^2/a) [\exp(2a/F) - 1]^{1/2}] . \end{aligned} \quad (11)$$

Выражение (11) можно существенно упростить в предположении, что интервал между измерениями T много меньше постоянной времени системы a , т.е. $F \gg a$. При этом, используя представление экспоненциальной функции степенным рядом, получим:

$$\begin{aligned} \Sigma_y = & (2\sigma_z^2 a + \sigma_0^2) / 2F + \\ & + \left[(2\sigma_z^2 a + \sigma_0^2)^2 / 4F^2 + \sigma_z^2 \sigma_0^2 / F \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (12)$$

или

$$\begin{aligned} \Sigma_y = & \frac{2\sigma_v^2 a \tau + \sigma_0^2 (\tau - \tau_0) \tau}{2E (\tau - \tau_0)} + \\ & \left[\frac{(2\sigma_v^2 a \tau + \sigma_0^2 (\tau - \tau_0) \tau)^2}{4E (\tau - \tau_0)^2} + \frac{\sigma_v^2 \sigma_0^2 \tau}{E (\tau - \tau_0)} \right]^{1/2} . \end{aligned} \quad (13)$$

Зависимость дисперсии априорных ошибок перед измерениями от величины длительности зондирующего сигнала τ_T приведена на рис. 1.

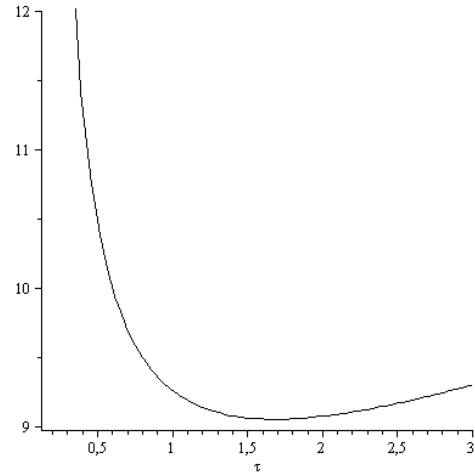


Рис. 1. Зависимость дисперсии априорных ошибок перед измерениями от величины длительности зондирующего сигнала ($E = 20$; $\tau_0 = 0,1$; $\sigma_v = 5$; $\sigma_0 = 2$; $a = 1$)

Из анализа рис. 1 может быть сделан вывод о наличии оптимальной длительности зондирующего сигнала. Для поиска значения оптимальной величины τ_T , доставляющей $\min$ критерию (13), продифференцируем это выражение по τ_T . В результате получим следующее выражение:

$$\begin{aligned}
\frac{d\Sigma_z}{d\tau} = & -\frac{1}{2E(\tau-\tau_0)^3} \left(-\sigma_0^4 \tau^4 + \right. \\
& + (3\sigma_0^4 \tau_0 - 2a\sigma_v^2 \sigma_0^2 - \sigma_0^2) \tau^3 + \\
& + 3(\sigma_0^2 \tau_0 - \sigma_0^4 \tau_0^2 + 2a\sigma_v^2 \sigma_0^2 \tau_0) \tau^2 + \\
& + (-3\sigma_0^2 \tau_0^2 + 2a\sigma_v^2 \tau_0 + 2\sigma_v^2 \sigma_0^2 \tau_0 - \\
& - 4a\sigma_v^2 \sigma_0^2 \tau_0^2 + \sigma_0^4 \tau_0^3 + 4a^2 \sigma_v^4 \tau_0) \tau - \\
& \left. - 2a\sigma_v^2 \tau_0^2 - 2\sigma_v^2 \sigma_0^2 \tau_0^2 + \sigma_0^2 \tau_0^3 \right). \quad (14)
\end{aligned}$$

Графически зависимость (14) представлена на рис. 2. Из анализа видно, что физически реализуемым значениям τ_T ($\tau_T \geq \tau_0$) соответствует только одно нулевое значение производной.

Приравняв значение производной к нулю и решив полученное уравнение $\frac{d\Sigma_z}{d\tau} = 0$ при заданных значениях дисперсий шумов в модели динамики сопровождаемой цели σ_0^2 и канале измерений σ_v^2 , выделенного на сопровождение конкретной цели временного ресурса E и величины непроизводительных потерь времени τ_0 в такте измерения, можно получить значение оптимальной длительности такта измерения τ_T и через уравнение (2) – оптимальную частоту повторения измерений F . Например, при рассматриваемых ранее значениях указанных параметров $\tau^{opt} = 1,68$ с.

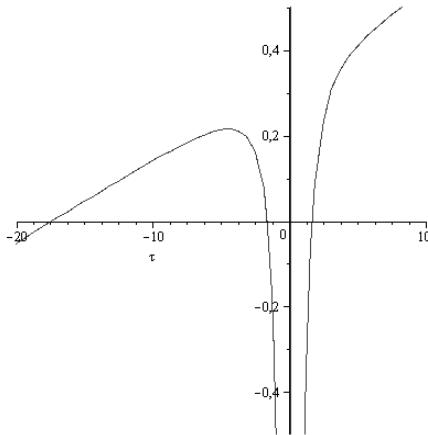


Рис. 2. Зависимость производной $\frac{d\Sigma_z}{d\tau}$ от величины длительности зондирующего сигнала ($E = 20$; $\tau_0 = 0,1$; $\sigma_v = 5$; $\sigma_0 = 2$; $a = 1$)

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы получено решение задачи оптимизации параметров режима сопровождения радиолокационного комплекса, которое сводится к выбору оптимальных моментов проведения измерений и оптимальной длительности каждого измерения, т.е. к выбору оптимального (в общем случае переменного) темпа локации. Отличие полученных результатов от ранее известных, заключается в том, что предложенный подход определяет (с учетом принятой терминологии) адаптивное управление темпом локации (частотой повторения и длительностью тактов измерения положения сопровождаемой цели) в зависимости от степени неопределенности в знании динамики цели и уровня шумов в канале измерений, а также временного ресурса, выделенного на сопровождение цели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Радио и связь, 1986. 352 с.
- [2] Конторов Д.С., Голубев-Новожилов Ю.С. Введение в радиолокационную системотехнику. М.: Сов. радио, 1971. 368 с.
- [3] Гришин И.Ю., Можар М.К., Решетник В.М. Проблемы управления зенитными ракетными комплексами // Наука и оборона. 1994. вып. 3. С. 27-32.
- [4] Гришин И.Ю., Можар М.К., Есин В.И. Оптимизация управления многопозиционным радиолокационным комплексом // Тез. докл. 2-й Всесоюз. науч.-техн. конф., Туапсе, 1991. С. 48-49.
- [5] S.F. Telenik and I.Yu. Grishin "Analysis of modern algorithms for secondary information processing in statistical measurement information systems", News of the Volodymyr Dahl Ukrainian National National University, vol. 1(131), part 2, 2009, pp. 145-155.
- [6] I. Prokopenko, V. Vovk and K. Prokopenko, "Fast resource management algorithm for multi-position radar systems," 2015 16th International Radar Symposium (IRS), Dresden, 2015, pp. 1045-1051.
- [7] A.I. Baskakov, A.A. Komarov, and A.V. Ruban, "Estimation of the energy characteristics of a multi-position radar system for the control of small-sized space debris for various orbital zones," 2018 Progress in electromagnetics research symposium, pp. 470-475, August 01-04, 2018.
- [8] I.Y. Grishin and R.R. Timirgaleeva "Air navigation: Optimisation control of means cueing of the air-traffic control system", Conference of Open Innovation Association FRUCT, 2018, pp. 134-140.
- [9] Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. Киев: КВЦ, 2000. 428 с.
- [10] S.Z. Kuzmin, T.V. Baringoltz, Iu.V. Datsenko, "The strategy of distribution of the energy resource in multipurpose radar systems with FAR", Int. sci. tech. conf Modern radiolocation, 1994.
- [11] Zhen Ding, "A survey of radar resource management algorithms", Electrical and Computer Engineering 2008. CCECE 2008. Canadian Conference on, no. 4-7, pp. 1559-001564, May 2008.