

УДК 621.396.9

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЛС МАЛОЙ ДАЛЬНОСТИ ПУТЕМ ОБЪЕДИНЕНИЯ В МНОГОПОЗИЦИОННУЮ СИСТЕМУ

© 2012 г.

К.В. Машиarov, Ю.Б. Попов

Сургутский госуниверситет

mkostya232@mail.ru

Поступила в редакцию 23.06.2011

Рассмотрены вопросы объединения РЛС в многопозиционную систему. Сравниваются алгоритмы оценки координат и навигационных параметров воздушной цели, на основе аппарата фильтрации Калмана, для однопозиционной и многопозиционной систем. Приведены результаты исследований, выполненных с помощью имитационного моделирования, которые демонстрируют работоспособность алгоритмов и позволяют сравнить полученные данные для двух систем.

Ключевые слова: фильтр Калмана, многопозиционная радиолокационная станция.

Введение

В настоящее время, несмотря на наличие хорошо разработанных методов анализа и синтеза радиолокационных станций и систем (РЛС) различного назначения, существуют проблемы проектирования, создания и эксплуатации новых образцов данного вида радиолокационной техники. Это связано прежде всего с усложнением целей и решаемых РЛС задач, повышением требований к показателям качества функционирования (точности, информативности, помехоустойчивости и т.д.), что, в свою очередь, приводит к усложнению их структуры и процессов функционирования [1].

К преимуществам многопозиционных систем, по сравнению с однопозиционными РЛС, следует отнести: более высокую помехоустойчивость; высокую точность завязки и сопровождения траекторий целей; большую информативность. Рассредоточенность в пространстве и избыточное число позиций значительно повышают живучесть многопозиционных РЛС (МПРЛС). При этом выход из строя какой-либо из позиций не приведет к полному нарушению работоспособности, а вызовет лишь частичное ухудшение характеристик МПРЛС [1].

В классических работах методы обнаружения, измерения координат и траекторий движения целей с помощью многопозиционных РЛС – активных и пассивных – представлены достаточно широко [2–5]. При этом подавляющее число известных методов основано на предположении, что цель находится в дальней зоне, т.е. дальность до цели в несколько раз превышает расстояние между приемными станциями МПРЛС. Это дает возможность использовать

линейные малопараметрические модели (как правило, полиномиальные) для задач траекторных измерений. Однако когда маневрирующая цель находится в ближней зоне, подобные модели не позволяют учесть существенную нелинейность текущих измерений, что неизбежно приводит к потерям в точности целеуказания. Особенно характерна такая ситуация для МПРЛС малой дальности. Выходом из данной ситуации является использование траекторных моделей, учитывающих нелинейный характер перемещения цели относительно системы многопозиционного измерения на малых дальностях. В качестве алгоритма обработки следует использовать нелинейные варианты фильтра Калмана.

В данной работе рассматривается алгоритм определения координат и параметров движения подвижной воздушной цели по измерениям, полученным от активных РЛС малой дальности. Задача решена в полярной системе координат, при этом алгоритм синтезирован на основе расширенного фильтра Калмана. Приводятся и сравниваются данные, полученные путем имитационного моделирования однопозиционной и многопозиционной систем.

Общая постановка задачи

Рассмотрим две системы, однопозиционную и четырехпозиционную, состоящие из неподвижных РЛС и воздушной цели (рис. 1). Однопозиционная система представляет собой только станцию C_1 . Четырехпозиционная система объединяет станции C_1, C_2, C_3, C_4 .

В качестве наблюдений выступают данные текущих измерений на станциях C_i , которые

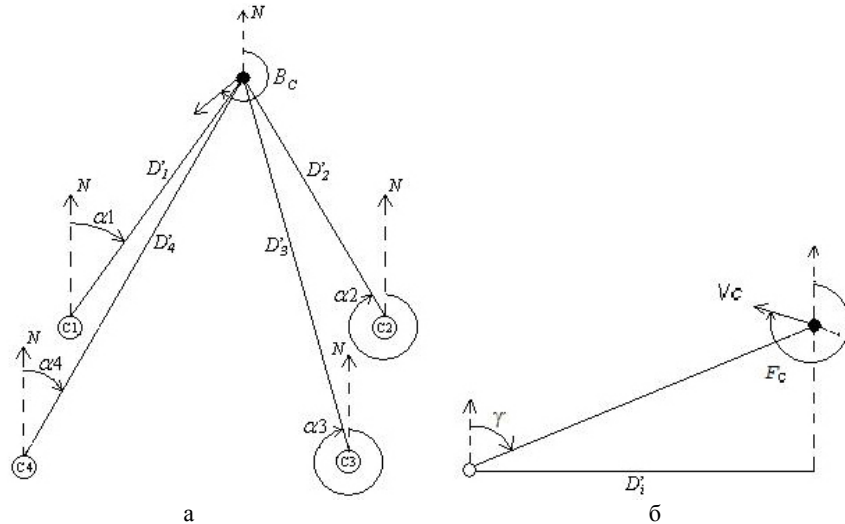


Рис. 1. Модель динамической системы в горизонтальной а) и вертикальной б) плоскости

содержат случайные ошибки. Измерения осуществляются в дискретные моменты времени с периодом T . РЛС измеряет: D – наклонную дальность от РЛС до цели (на рис. 1 D'_i – проекция наклонной дальности на горизонтальную плоскость); α – азимут цели, который отсчитывается от направления на север (N) и показывает, под каким углом находится цель по отношению к РЛС; γ – угол места цели, отсчитывается от направления в зенит.

Для полярной системы координат, из геометрических соображений, динамика взаимного перемещения объектов может быть описана системами дифференциальных уравнений первого порядка в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{D} = V_C \cdot \cos(\alpha - B_C) \cdot \cos(\gamma - F_C), \\ \dot{\alpha}_1 = \frac{-V_C \cdot \sin(\alpha - B_C)}{D} \cdot \cos(\gamma - F_C), \\ \dot{\gamma}_1 = \frac{-V_C \cdot \sin(\gamma - F_C)}{D} \cdot \cos(\alpha - B_C), \\ \dot{V}_C = 0, \\ \dot{B}_C = 0, \\ \dot{F}_C = 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{D}_1 = V_C \cdot \cos(\alpha_1 - B_C) \cdot \cos(\gamma_1 - F_C), \\ \dot{\alpha}_1 = \frac{-V_C \cdot \sin(\alpha_1 - B_C)}{D_1} \cdot \cos(\gamma_1 - F_C), \\ \dot{\gamma}_1 = \frac{-V_C \cdot \sin(\gamma_1 - F_C)}{D_1} \cdot \cos(\alpha_1 - B_C), \\ \dots \\ \dot{\gamma}_4 = \frac{-V_C \cdot \sin(\gamma_4 - F_C)}{D_4} \cdot \cos(\alpha_4 - B_C), \\ \dot{V}_C = 0, \\ \dot{B}_C = 0, \\ \dot{F}_C = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где D_i , α_i , γ_i – дальности до цели, азимут и угол от места цели относительно станций C_i соответственно; F_C – тангаж цели, отсчитывается от вертикали; V_C – скорость цели; B_C – курс цели, отсчитывается от направления на север. Первая система уравнений (1) для однопозиционной, вторая (2) для многопозиционной системы.

Методы теории марковской фильтрации нашли широкое применение в решении задач оценки состояния сложных динамических систем, в условиях, когда параметры этих систем носят случайный характер [3, 5]. Задача оценивания предполагает, во-первых, задание динамической модели пространственно-временной изменчивости системы в виде дифференциальных уравнений (уравнения состояния) и, во-вторых, определение функциональных связей между оцениваемыми параметрами системы и фактическими измерениями. С помощью методов оценивания, на основе заданных моделей состояний и наблюдений, реализуются алгоритмы оценивания.

Введем векторы состояний, включающие неизвестные и подлежащие оцениванию переменные системы, для однопозиционной (3) и четырехпозиционной (4) систем:

$$X(k)^T = \|D \ \alpha \ \gamma \ V_C \ B_C \ F_C\| = \|X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4 \ X_5 \ X_6\|, \quad (3)$$

$$X(k)^T = \|D_1 \ \alpha_1 \ \gamma_1 \ \dots \ \gamma_4 \ V_C \ B_C \ F_C\| = \|X_1 \ X_2 \ X_3 \ \dots \ X_{12} \ X_{13} \ X_{14} \ X_{15}\|. \quad (4)$$

Функциональные связи между выбранными векторами состояния и измерительными каналами запишем как уравнения наблюдений для однопозиционной (5) и четырехпозиционной (6) систем:

$$\begin{cases} Z_1(k) = X_1(k) + \varepsilon_1, \\ Z_2(k) = X_2(k) + \varepsilon_2, \\ Z_3(k) = X_3(k) + \varepsilon_3, \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} Z_1(k) = X_1(k) + \varepsilon_1, \\ Z_2(k) = X_2(k) + \varepsilon_2, \\ \dots, \\ Z_{12}(k) = X_{12}(k) + \varepsilon_{12}, \end{cases} \quad (6)$$

где $X_1(k) \dots X_i(k)$ – текущие координаты цели, $\varepsilon_1(k) \dots \varepsilon_i(k)$ – эквивалентные шумы наблюдений.

Синтез структуры фильтра Калмана

Для учета нелинейности, возникшей при записи систем уравнений (1), (2), будем использовать расширенный фильтр Калмана [5]. Суть алгоритма оценивания заключается в последовательном предсказании искомых параметров системы с использованием модели состояний с последующей коррекцией результатов по данным фактических измерений.

В этом случае для синтеза алгоритма используем уравнение оптимального оценивания следующего вида:

$$\hat{X}(k+1) = \hat{X}(k+1|k) + G(k+1)(Z(k+1) - H(k+1) \cdot \hat{X}(k+1|k)), \quad (7)$$

где $\hat{X}(k+1)$ – оценка вектора состояния на момент времени $(k+1)$;

$\hat{X}(k+1|k)$ – вектор предсказанных оценок на момент времени $(k+1)$ по данным на шаге k ;

$G(k+1)$ – матрица весовых коэффициентов;

$\hat{X}(k+1|k) = \Phi(\hat{X}, k)$ – матричное уравнение для расчета вектора предсказания.

Матрица весовых коэффициентов:

$$G(k+1) = P(k+1|k)H^T \times [HP(k+1|k)H^T + R_E(k+1)]^{-1}, \quad (8)$$

где $P(k+1|k) = FP(k|k)F^T + R_W(k)$ – апостериорная матрица ковариаций ошибок предсказания; H – матрица наблюдений; при этом

$$F(\hat{X}, k) = \frac{\partial \Phi(\hat{X}, k)}{\partial \hat{X}}$$

является матрицей Якоби от $\Phi(\hat{X}, k)$;

$P(k+1|k+1) = [I - G(k+1)H]P(k+1|k)$ – апостериорная матрица ковариации ошибок оценивания; I – диагональная единичная матрица;

$R_E(k+1)$, $R_W(k)$ – диагональные ковариационные матрицы шумов наблюдения и состояния.

Для инициации работы алгоритма необходимо задать начальные значения матрицы ковариации ошибок оценивания $P(0|0)$, начальный вектор оценок $\hat{X}(0)$ и диагональные элементы корреляционных матриц ошибок наблюдения $R_E(k+1)$ и состояния $R_W(k)$.

Начальные значения вектора $\hat{X}(0)$ могут быть заданы как средние величины исходя из предполагаемых значений максимальной и минимальной дистанций, а также максимальной и минимальной скорости. Априорная корреляционная матрица ошибок оценивания является диагональной. Значения диагональных элементов соответствуют дисперсиям ошибок оценивания в начальный момент времени.

Методика и результаты исследования алгоритма

Для исследования качества работы синтезированного алгоритма в среде Borland Delphi v.7.0 была разработана программа имитационного моделирования. Программа состоит из трех блоков: имитатор, фильтр Калмана, блок статистической обработки.

Первый блок имитирует перемещение цели относительно станций, рассчитывая текущие значения дальностей, пеленгов и углов места цели. Полученные значения суммируются с шумами, тем самым имитируется работа соответствующих каналов наблюдений. Блок статистической обработки предназначен для оценки качества работы фильтра при многократной реализации сеансов измерений. Данные, полученные в имитаторе, и оценки алгоритма сравниваются, и вычисляется среднеквадратическая ошибка оценивания.

Для исследований были выбраны следующие параметры цели: $B_C=180^\circ$ – курс цели, $F_C=270^\circ$ – тангаж цели, $V_C=1500$ км/ч – скорость цели. Количество сеансов, использованных для набора статистики, $N=300$, $T=10$ мс. Также заданы начальные координаты цели относительно первой станции: $D(0)=10$ км, $\alpha(0)=2^\circ$. Таким образом, предполагается, что цель движется с севера, по направлению к станциям на неизменной высоте.

Работа алгоритмов была исследована при различных ошибках в каналах измерений, σ_D – СКО шумов в канале наблюдений дальности цели, σ_α – СКО шумов в каналах наблюдений азимута, σ_γ – СКО шумов в каналах наблюдений угла места цели. Ошибки задавались в пределах: $\sigma_D=10-50$ м; $\sigma_\alpha=0.3^\circ-1^\circ$; $\sigma_\gamma=0.3^\circ-1^\circ$.

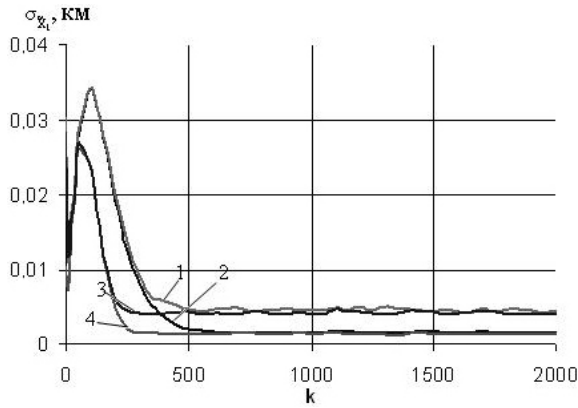


Рис. 2. Графики СКО оценивания дальности цели

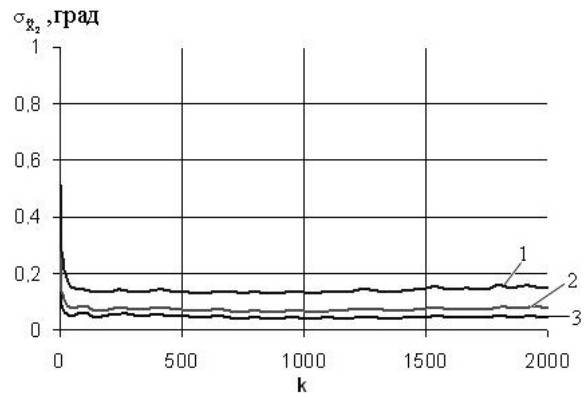


Рис. 3. Графики СКО оценивания азимута цели

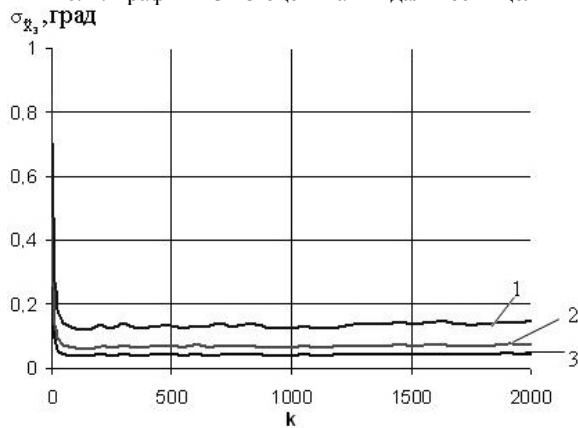


Рис. 4. Графики СКО оценивания угла места цели

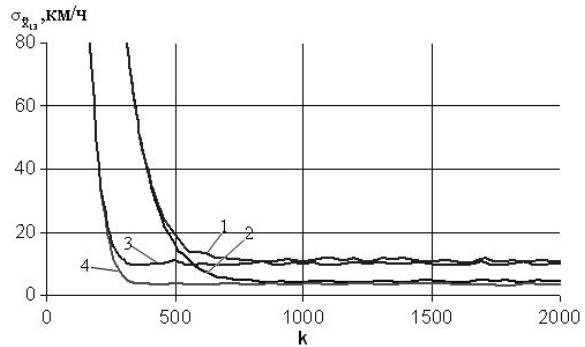


Рис. 5. Графики СКО оценивания скорости цели

На рис. 2 приведены результаты исследования сходимости оценок дальности. При расчетах ошибки измерения угловых координат цели для всех станций задавались значениями $\sigma_\alpha=0.3^\circ$; $\sigma_\gamma=0.3^\circ$. Ошибки в канале наблюдений дальности варьировались. Графики представляют поведение среднеквадратической ошибки оценивания дальности $\sigma_{\bar{x}_1}$ для следующих случаев:

однопозиционная система, 1 – $\sigma_D=30$ м; 2 – $\sigma_D=10$ м;

многопозиционная система, 3 – $\sigma_D=30$ м; 4 – $\sigma_D=10$ м.

Результаты исследований сходимости фильтров по азимуту и углу места приведены на рис. 3, 4. На графиках показана эволюция во времени среднеквадратической ошибки оценивания азимута $\sigma_{\bar{x}_2}$ и угла места $\sigma_{\bar{x}_3}$, при ошибках измерения по дальности $\sigma_D=10$ м, по угловым координатам: 1 – $\sigma_\alpha=\sigma_\gamma=1^\circ$; 2 – $\sigma_\alpha=\sigma_\gamma=0.5^\circ$; 3 – $\sigma_\alpha=\sigma_\gamma=0.3^\circ$. Результаты для однопозиционной и многопозиционной систем не имеют заметных отличий. Фильтр быстро сходится для обеих систем и устанавливается на определенной величине.

Также было исследовано влияние интенсивности шумов в каналах измерений на сходимость фильтра при оценке скорости, курса и

тангажа цели. Из проведенных исследований видно, что значения СКО оценивания для многопозиционной системы уменьшаются и уже к 2-й – 3-й секунде от начала оценивания, все устанавливается на определенной величине, которая значительно меньше вносимых ошибок в канале наблюдения.

На рис. 5, 6 представлены графики: $\sigma_{\bar{x}_{13}}$ – СКО оценивания скорости цели, $\sigma_{\bar{x}_{14}}$ – СКО оценивания курса. Графики получены для следующих случаев:

однопозиционная система, 1 – $\sigma_D=30$ м;

$\sigma_\alpha=0.3^\circ$; $\sigma_\gamma=0.3^\circ$; 2 – $\sigma_D=10$ м; $\sigma_\alpha=0.3^\circ$; $\sigma_\gamma=0.3^\circ$;

многопозиционная система, 3 – $\sigma_D=30$ м;

$\sigma_\alpha=0.3^\circ$; $\sigma_\gamma=0.3^\circ$; 4 – $\sigma_D=10$ м; $\sigma_\alpha=0.3^\circ$; $\sigma_\gamma=0.3^\circ$.

На рис. 7 представлен график $\sigma_{\bar{x}_{15}}$ – СКО оценивания тангажа цели. Графики получены для следующих случаев:

однопозиционная система, 1 – $\sigma_D=10$ м;

$\sigma_\alpha=0.5^\circ$; $\sigma_\gamma=0.5^\circ$; 2 – $\sigma_D=10$ м; $\sigma_\alpha=0.3^\circ$; $\sigma_\gamma=0.3^\circ$;

многопозиционная система, 3 – $\sigma_D=10$ м;

$\sigma_\alpha=0.5^\circ$; $\sigma_\gamma=0.5^\circ$; 4 – $\sigma_D=10$ м; $\sigma_\alpha=0.3^\circ$; $\sigma_\gamma=0.3^\circ$.

Приведенные результаты исследований показывают работоспособность алгоритмов и позволяют определить точность оценивания координат и параметров движения цели, а также сравнить две системы.

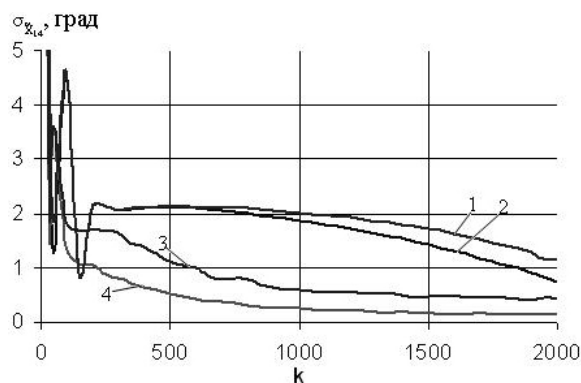


Рис. 6. Графики СКО оценивания курса цели

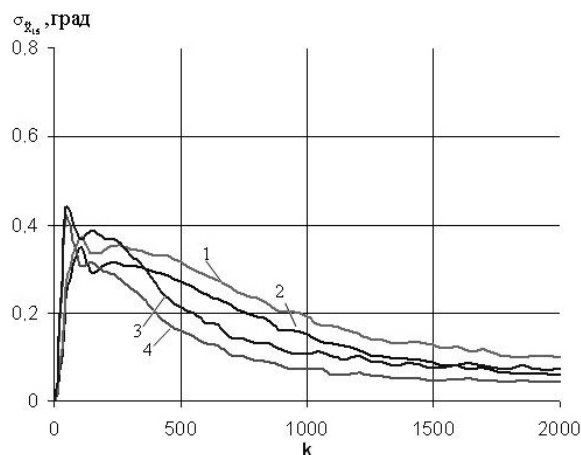


Рис. 7. Графики СКО оценивания тангажа цели

Результаты исследований показывают, что алгоритм для многопозиционной системы обладает рядом преимуществ:

- увеличение скорости сходимости оценивания дальности до цели в 2 раза;
- увеличение сходимости оценивания скорости цели в 2.5–3 раза;
- увеличение точности оценивания тангажа цели в 1.5–2 раза;
- увеличение точности оценивания курса цели в 3–5 раз.

Результаты исследования обеих систем для азимута и угла места цели не имеют больших отличий.

Дальнейшее развитие данного алгоритма следует направить в сторону адаптации к потерям данных в каналах взаимодействия информацией между станциями [6], а также к учету возможного маневра цели.

Список литературы

1. Зайцев Д.В. Многопозиционные радиолокационные системы. Методы и алгоритмы обработки информации в условиях помех. М.: Радиотехника, 2007. 96 с.
2. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.
3. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. 416 с.
4. Соколова А.В. Вопросы перспективной радиолокации. М.: Радиотехника, 2003. 512 с.
5. Сейдж Э., Мелс Дж.Л. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М.: Связь, 1976. 496 с.
6. Гришин Ю.П., Казаринов Ю.М. Динамические системы, устойчивые к отказам. М.: Радио и связь, 1985. 176 с.

IMPROVING THE PERFORMANCE OF SHORT-RANGE RADARS BY COMBINING THEM INTO A MULTISITE SYSTEM

K. V. Masharov, Yu. B. Popov

The paper considers combining several short-range radars into a multiple radar system. Algorithms of aerial target coordinate and navigation parameter estimation are compared for single and multisite radars on the basis of Kalman filtering simulation. The simulation results demonstrate the efficiency of proposed algorithms and allow us to compare the data obtained for the two systems.

Keywords: Kalman filter, multisite radar.