

УДК 621.396.96+621.391.8

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЗОРНЫХ РЛС ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ В СЛОЖНЫХ СИГНАЛЬНО-ПОМЕХОВЫХ СИТУАЦИЯХ

ВУ ТХАНЬ ХА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

E-mail: kozlov@bsuir.by

Аннотация. Приведены основные положения методики комплексного исследования эффективности функционирования обзорных РЛС в условиях воздействия внешних помех и мешающих отражений. Рассмотрены модели пространственной ситуации и модели первичной и вторичной обработки в обзорных РЛС.

Abstract. The main provisions of the methodology for a comprehensive study of the effectiveness of the operation of surveillance radars under the influence of external interference and interfering reflection are presented. Models of a radar target, interference, spatial situation and models of primary and secondary processing in surveillance radars are considered.

Для оценки влияния алгоритмов [1-3] первичной обработки информации в обзорных РЛС обнаружения воздушных объектов с многоканальными приемными системами на полноту и точность выдаваемой ими радиолокационной информации необходим совместный анализ этапов первичной, так и вторичной обработки радиолокационной информации. Влияние алгоритмов целесообразно проводить для сложных сигнально-помеховых ситуациях, характеризующихся близким угловым расположением радиолокационных целей и источников помех и интенсивной динамикой их перемещения. Это требует разработки соответствующей методики (математической модели) и является целью настоящей работы.

Структурная схема комплексной методики исследования эффективности функционирования обзорных РЛС представлена на рис. 1. Методика включает следующие составные части: модель радиолокационной цели; модели помех; блок пространственной ситуации (движения цели и источников помех); модель первичной обработки в РЛС с многоканальными антенными системами для вариантов при отсутствии и наличии мешающих отражений; модель совместного обнаружения-измерения дальности элементов групповой цели с использованием оценочно-компенсационного подхода; модель вторичной обработки в РЛС и блок статистической обработки результатов моделирования.

Для исследования эффективности функционирования обзорной РЛС на этапе сопровождения цели и оценки влияния алгоритмов первичной и вторичной обработки информации на качество сопровождения цели были сформированы две типовые сигнально-помеховые ситуации (СПС) СПС-1,-2.

В СПС-1 (рис. 2.) цель или группа целей сближается с РЛС с дальности 200 км. Траектория движения цели прямолинейная, курсовой параметр цели относительно РЛС составляет 30 км, скорость движения цели 200 м/с. Единственный источник помех перемещается в зоне барражирования, центр которой удален по оси Оу от цели на расстояние 60 км. Зона барражирования ориентирована по оси Оу и состоит из двух участков прямолинейного движения длиной 20 км и двух участков разворота на 180°. Скорость движения источника помех (ИП) составляет 200 м/с, нормальное ускорение на участках разворота 5 м/с².

На рис. 2.б для СПС-1 приведены зависимости азимута цели и ИП от номера обзора. Как видно из рис. 2., на всей протяженности маршрута ИП с учетом ширины главного лепестка ДН антенны РЛС воздействует по боковым лепесткам ДН антенны РЛС и помеховая ситуация является относительно простой.



Рис. 1. Структурная схема комплексной методики исследования эффективности

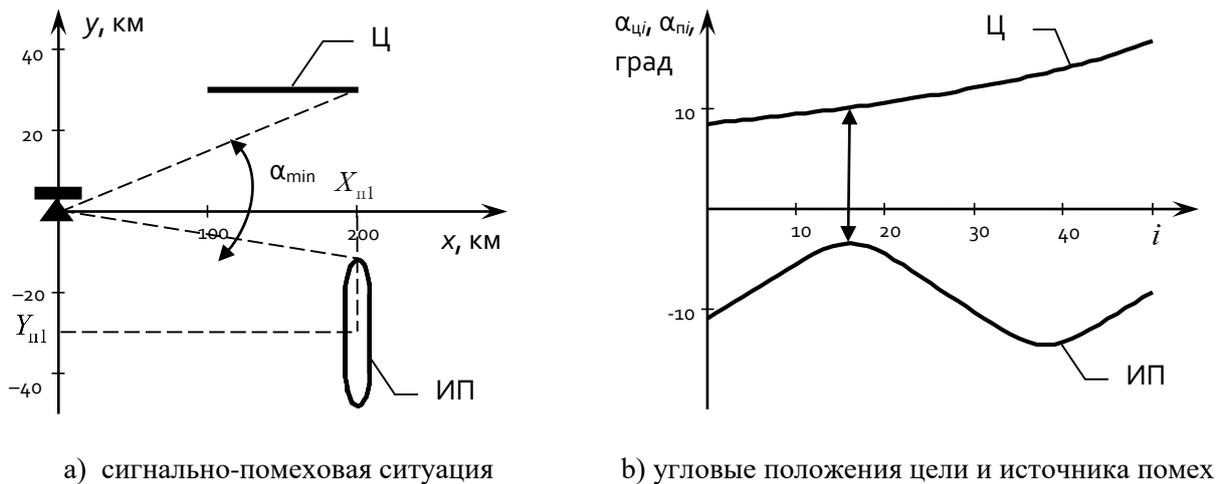


Рис. 2. Траектории цели и источника помех в зависимости от номера обзора для СПС-1

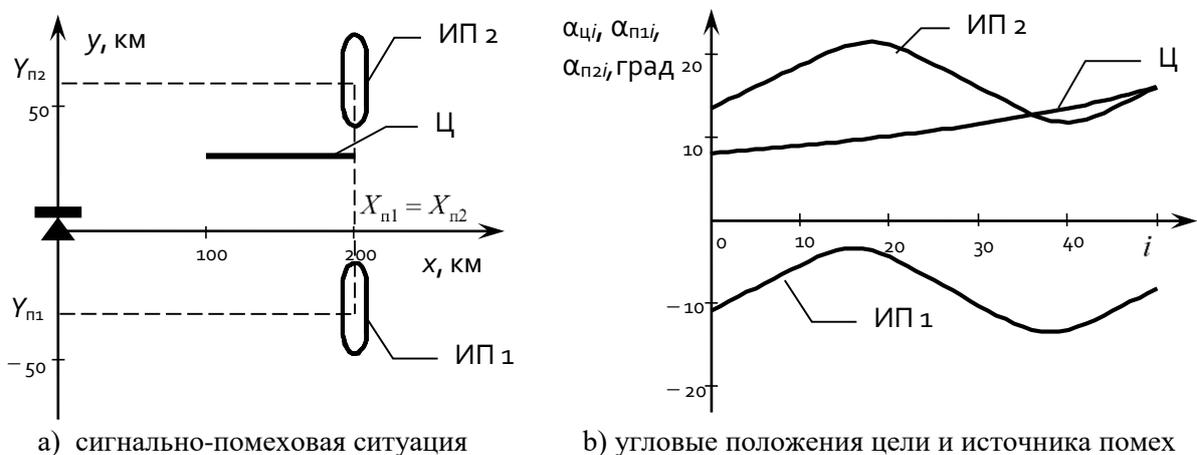


Рис. 3. Траектории цели и источников помех в зависимости от номера обзора для СПС-2

В СПС-2 (рис. 3.) траектория цели или группы целей аналогична СПС-1, однако помехи создаются двумя источниками. Зона барражирования первого ИП расположена аналогично СПС-1, а центр зоны барражирования второго ИП находится в точке $(X_{п2}, Y_{п2})$ и, таким образом, угловые координаты цели и ИП-1 на всем интервале наблюдения в 50 обзоров РЛС оказываются близкими (рис. 3.б). Так, при выбранном начальном положении второго ИП на 33 обзоре его угловое положение будет практически совпадать с угловым положением цели. В среднем, ИП-2 будет воздействовать по главному и первым боковым лепесткам ДН антенны РЛС и влияние помех будет максимально интенсивным.

В процессе моделирования в каждой реализации начальное положение ИП-1 и ИП-2 в зоне барражирования может выбрано случайным, что позволяет избежать детерминированного характера ситуаций с сохранением средней интенсивности воздействия помех.

Входными данными для алгоритмов [1, 2] первичной обработки информации являются:

- векторы \mathbf{r} дальностей, α азимутов цели или группы целей и мощностей \mathbf{p} отраженного от цели сигнала и источников помех, которые рассчитываются в блоке пространственной ситуации;
- параметры мешающих отражений;
- интервал корреляции флуктуаций отраженного сигнала;
- параметры алгоритма обработки (шаг поиска максимума функции правдоподобия, вид алгоритма адаптации, число отсчетов при формировании выборочной корреляционной матрицы (КМ) процессов на выходах приемных каналов).

Выходными данными для моделей первичной обработки информации являются: факт обнаружения и значения измеренных дальностей до цели \hat{r}_i , азимута цели $\hat{\alpha}_i$, дисперсий измерения дальности $D_i^{(r)}$ и азимута цели $D_i^{(\alpha)}$ для каждого обзора.

Эти данные поступают на модель вторичной обработки информации, в качестве которой используется модель сопровождения маневрирующей цели с использованием расширенного фильтра Калмана с непосредственным воспроизведением логики захвата и сброса целей на сопровождения [4].

Выходными данными для алгоритма являются: S_i – факт сопровождения цели на i -ом обзоре;

$\theta_i = (\tilde{r}_i, \tilde{V}_{r_i}, \tilde{a}_{r_i}, \tilde{\alpha}_i, \tilde{V}_{\alpha_i}, \tilde{a}_{\alpha_i})^T$ – слаженная дальность, радиальная скорость, радиальное ускорение цели, азимут, угловая скорость и угловое ускорение цели; $\mathbf{P}_i^{(e)}$ – КМ ошибок оценивания вектора θ_i .

При Калмановской фильтрации используется модель движения цели с коррелированными значениями ускорения (модель Зингера). Уравнения фильтра Калмана для данного случая записываются в виде

$$\begin{cases} \theta_i^{(e)} = \Phi \theta_{i-1}; \quad \mathbf{P}_i^{(e)} = \Phi \mathbf{P}_{i-1} \Phi^T + \mathbf{G} \mathbf{Q} \mathbf{G}^T; \\ \theta_i = \theta_i^{(e)} + \mathbf{P}_i^{(e)} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_i^{(e)} \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \left(\begin{pmatrix} \hat{r}_i \\ \hat{\alpha}_i \end{pmatrix} - \mathbf{H} \theta_i^{(e)} \right); \\ \mathbf{P}_i = \mathbf{P}_i^{(e)} - \mathbf{P}_i^{(e)} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_i^{(e)} \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{H} \mathbf{P}_i^{(e)}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\theta_i^{(e)}$, $\mathbf{P}_i^{(e)}$ – экстраполированная на i -й шаг оценка вектора состояния и корреляционная матрица указанной оценки;

$$\Phi = \begin{pmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho \end{pmatrix} \text{ – фундаментальная матрица; } \mathbf{G} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}^T \text{ – матрицы связи;}$$

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \sigma_{M1}^2(1-\rho^2) & 0 \\ 0 & \sigma_{M2}^2(1-\rho^2) \end{pmatrix} - \text{корреляционная матрица шумов маневра; } \mathbf{R} = \begin{pmatrix} D_i^{(r)} & 0 \\ 0 & D_i^{(\alpha)} \end{pmatrix} -$$

корреляционная матрица ошибок оценивания дальности и азимута; $\sigma_{M1}^2 = \frac{A^2 T^2}{3}(1+4P_1-P_2)$,

$\sigma_{M2}^2 = \frac{\sigma_{M1}^2}{r^2}$ – значения дисперсий интенсивности маневра; $\rho = e^{-T/T_m}$ – коэффициент корреляции;

T – период обзора; T_m – среднее время манера цели; A – максимальное ускорение цели; P_1 – вероятность максимального ускорения цели; P_2 – вероятность нулевого ускорения цели.

Фильтр Калмана начинает работать при наличии двух измерений. Вектор состояния θ и корреляционную матрицу ошибок оценивания вектора состояния при наличии двух измерений в обзорах с номерами $i_2 > i_1$ можно представить в виде

$$\theta_{i_2} = \begin{pmatrix} \hat{r}_{i_2} - \hat{r}_{i_1} & \frac{\hat{r}_{i_2} - \hat{r}_{i_1}}{\Delta T} & 0 & \hat{\alpha}_{i_2} - \hat{\alpha}_{i_1} & \frac{\hat{\alpha}_{i_2} - \hat{\alpha}_{i_1}}{\Delta T} & 0 \end{pmatrix}^T$$

$$P_{i_2} = \begin{pmatrix} \sigma_r^2 & \sigma_r^2 / \Delta T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sigma_r^2 / \Delta T & \sigma_{M1}^2 + 2\sigma_r^2 / \Delta T^2 & \rho\sigma_{M1}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho\sigma_{M1}^2 & \sigma_{M1}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_\alpha^2 & \sigma_\alpha^2 / \Delta T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_\alpha^2 / \Delta T & \sigma_{M2}^2 + 2\sigma_\alpha^2 / \Delta T^2 & \rho\sigma_{M2}^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \rho\sigma_{M2}^2 & \sigma_{M2}^2 \end{pmatrix}$$

где $\sigma_r^2 = D_i^{(r)} + D_{i_z}^{(r)}$; $\sigma_\alpha^2 = D_i^{(\alpha)} + D_{i_z}^{(\alpha)}$ – дисперсия измерения дальности и азимута;

$\Delta T = (i_2 - i_1)T$ – шаг по времени при завязке траектории.

При этом воспроизводятся известные процедуры завязки новых траекторий, селекции отметок в строгах сопровождения, выбора одиночной отметки, наиболее близкой к центру экстраполированного строга сопровождения, проверки числа пропусков при сопровождении траектории и другие необходимые операции вторичной обработки в соответствии с [4].

Обработка результатов моделирования по множеству реализация заключается в оценке:

- математического ожидания $m(r)$ числа сопровождаемых (с ошибками, не более заданной величины) целей в зависимости от дальности «центр групповой цели-РЛС» и полноты радиолокационной информации в зависимости от дальности

$$\Pi(r) = \frac{m(r)}{M}, \quad (2)$$

где M – число целей в составе групповой, и среднего по зоне действия РЛС значения полноты радиолокационной информации

$$\bar{\Pi} = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \Pi(r) dr, \quad (3)$$

где r_{\min} , r_{\max} – минимальная и максимальная границы зоны действия РЛС, определяемые из практических соображений;

- средние квадратические ошибки $\sigma_{x,y}(r)$ определения координат целей в зависимости от дальности; указанные средние квадратические ошибки могут быть дополнительно усреднены в заданных диапазонах дальности.

Выбранные показатели полноты \bar{P} и точности $\sigma_{x,y}(r)$ выдаваемой радиолокационной информации позволят в рамках имитационного подхода объективно оценить влияние предлагаемых алгоритмов первичной и известных алгоритмов вторичной обработки радиолокационной информации с учетом их тесной взаимосвязи через статистические характеристики обнаружения и измерения координат воздушных объектов и динамику изменения сигнально-помеховых ситуаций.

Список использованных источников

1. Козлов, С. В. Оценивание угловых координат в обзорных радиолокационных станциях с подсистемами пространственной компенсации помех / С. В. Козлов, Ву Тхань Ха // Доклады БГУИР. – 2019. – № 4(122). – С. 48–56.
2. Козлов, С. В. Алгоритмы обработки сигналов в радиолокационных измерителях угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой / С. В. Козлов, Ву Тхань Ха // Журнал радиоэлектроники. – 2019. – № 11. – С. 1–29. DOI 10.30898/1684-1719.2019.11.10.
3. Козлов, С. В. Совместное обнаружение-измерение дальности элементов групповой цели в обзорных радиолокационных станциях с использованием оценочно-компенсационного подхода / С. В. Козлов, Ву Тхань Ха // Доклады БГУИР. – 2018. – № 4(114). – С. 79–86.
4. Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Сов. Радио, 1974. 432 с.