

УДК 621.396.96

Е.Л. Казаков, А.В. Коломийцев, С.И. Клевец, А.С. Петренко

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

МЕТОД И УСТРОЙСТВО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ЦЕЛИ ПО ОГИБАЮЩИМ АМПЛИТУД ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ, ПРИНИМАЕМЫХ НА РАЗНЫХ ЧАСТОТАХ ТРЕМЯ РАЗНЕСЕННЫМИ НА МЕСТНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫМИ СТАНЦИЯМИ

Разработаны метод определения усредненных продольного и поперечного размеров радиолокационной цели (РЦ) и устройство, реализующее этот метод. Получены выражения для определения нормированных временных коэффициентов взаимной корреляции огибающих квадратов амплитуд отраженных сигналов, принимаемых тремя разнесенными на местности радиолокационными станциями (РЛС), работающими на трех различных частотах. Показано, что при проведении соответствующей обработки данных коэффициентов взаимной корреляции могут быть определены усредненные продольный и поперечный размеры наблюдаемой РЦ. Предложена структурная схема и раскрыт принцип работы устройства, реализующего предлагаемый метод. Проведена экспериментальная проверка данного метода.

Ключевые слова: радиолокационная цель, коэффициент взаимной корреляции огибающих амплитуд, продольный и поперечный размеры РЦ, разнесенные на местности РЛС.

Введение

Постановка проблемы и анализ литературы.

К настоящему времени в научно-технической литературе подробно рассматриваются вопросы получения информации о геометрических характеристиках воздушных РЦ, которые могут быть использованы в качестве признаков распознавания [1 – 5]. Однако, эти вопросы и разрабатываемые методы рассматриваются применительно к однопозиционным РЛС, использующим простые [1, 2] или сложные [3, 4] сигналы. В первом случае измерения сопровождаются существенными ошибками, а во втором – требуют применения сложной аппаратуры для излучения, приема и обработки сложных сигналов. В связи с этим необходимо разработать методы обработки достаточно простых сигналов в системе разнесенных на местности РЛС для получения информации о размерах наблюдаемой РЦ с высокой точностью.

Поэтому разработка метода и устройства определения размеров радиолокационной цели по сигнальной информации разнесенной системы РЛС при использовании простых сигналов является актуальной научно-технической задачей.

Цель статьи. Разработать новый метод определения размеров РЦ по сигнальной информации от трех разнесенных на местности РЛС и устройство, реализующее данный метод. Провести экспериментальную проверку полученных результатов.

Основной материал

Рассмотрим систему из двух разнесенных на угол β РЛС, работающих на частотах f_1 и f_2 и наблюдающих цель в течении некоторого временного

интервала. Тогда с использованием математической модели цели [6] можно записать выражение для квадратов амплитуд отраженных сигналов, принимаемых этими РЛС, в виде:

$$|\dot{E}_1(t)|^2 = \sum_{i=1}^N |\dot{S}_{i1}(t)|^2 + 2 \sum_{i,n=1, i>n}^N |\dot{S}_{i1}(t)| |\dot{S}_{n1}(t)| \times \cos \left\{ -2m_1 [x_{n1}(t) - x_{i1}(t)] + [\phi_{i1}(t) - \phi_{n1}(t)] \right\}; \quad (1,а)$$

$$|\dot{E}_2(t, \beta)|^2 = \sum_{i=1}^N |\dot{S}_{i2}(t, \beta)|^2 + 2 \sum_{i,n=1, i>n}^N |\dot{S}_{i2}(t, \beta)| \times |\dot{S}_{n2}(t, \beta)| \cos \left\{ -2m_2 [x_{n2}(t) - x_{i2}(t)] + [\phi_{i2}(t, \beta) - \phi_{n2}(t, \beta)] \right\}, \quad (1,б)$$

где \dot{S}_i, \dot{S}_n – комплексные коэффициенты отражения отражателей цели применительно к 1-й и 2-й РЛС; x_i, x_n – координаты отражателей цели вдоль линий визирования 1-й и 2-й РЛС; N – количество отражателей цели; $m = 2\pi/\lambda$ – волновой коэффициент; ϕ_1, ϕ_2 – фазы комплексных коэффициентов отражения отражателей цели, применительно к 1-й и 2-й РЛС.

Выразим значение координат отражателей цели, наблюдаемой второй РЛС, через соответствующие координаты первой РЛС [7]:

$$\begin{aligned} x_{i2}(t) &= x_{i1}(t) \cos \beta - y_{i1}(t) \sin \beta, \\ x_{n2}(t) &= x_{n1}(t) \cos \beta - y_{n1}(t) \sin \beta, \end{aligned} \quad (2)$$

где y_i, y_n – координаты отражателей цели вдоль оси перпендикулярной линии визирования 1-й РЛС.

Проведем преобразование выражения (1, б) с учетом выражения (2). Тогда получим выражение для огибающей квадратов амплитуд отраженных от РЦ сигналов, принимаемых 2-й РЛС в виде:

$$\begin{aligned}
 & \left| \dot{E}_2(t, \beta) \right|^2 = \\
 & = \sum_{i=1}^N \left| \dot{S}_{i2}(t, \beta) \right|^2 + 2 \sum_{i,n=1, i>n}^N \left| \dot{S}_{i2}(t, \beta) \right| \left| \dot{S}_{n2}(t, \beta) \right| \times (3) \\
 & \times \cos \left\{ \begin{aligned} & -2m_2 \left[\begin{aligned} & (x_{n1}(t) \cos \beta - y_{n1}(t) \sin \beta) - \\ & -(x_{i1}(t) \cos \beta - y_{i1}(t) \sin \beta) \end{aligned} \right] + \\ & + [\phi_{i2}(t, \beta) - \phi_{n2}(t, \beta)] \end{aligned} \right\}.
 \end{aligned}$$

Получим выражение для временной взаимной корреляционной функции огибающих квадратов амплитуд отраженных от цели сигналов, принимаемых первой и второй РЛС на частотах f_1 и f_2 , с учетом формул (1, а) и (3) [3].

При этом предположим, что случайные процессы изменения комплексных коэффициентов отражения и координат отражателей цели являются квазистационарными и эргодическими. Тогда можно перейти от усреднения по времени к статистическому усреднению и получить данное выражение в виде:

$$\begin{aligned}
 & B_{12}(t, \beta) = \sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^N \langle \left| \dot{S}_{i1}(t) \right|^2 \left| \dot{S}_{n2}(t, \beta) \right|^2 \rangle + \\
 & + 2 \sum_{i,n=1, i>n}^N \langle \left| \dot{S}_{i1}(t) \right| \left| \dot{S}_{n1}(t) \right| \left| \dot{S}_{i2}(t, \beta) \right| \left| \dot{S}_{n2}(t, \beta) \right| \rangle \times \\
 & \times \langle \cos \{ -2m_1 [x_{n1}(t) - x_{i1}(t)] \} \rangle \times \\
 & \times \cos \left\{ -2m_2 \left[\begin{aligned} & (x_{n1}(t) \cos \beta - y_{n1}(t) \sin \beta) - \\ & -(x_{i1}(t) \cos \beta - y_{i1}(t) \sin \beta) \end{aligned} \right] \right\}, \quad (4)
 \end{aligned}$$

где $\langle \dots \rangle$ – знак статистического усреднения.

В дальнейшем получим выражение для нормированного временного коэффициента взаимной корреляции огибающих квадратов амплитуд отраженных сигналов, принимаемых 1-й и 2-й РЛС. Для получения этого выражения предположим:

1) члены в выражении (4), которые зависят от изменения модулей комплексных коэффициентов отражения отражателей РЦ, являются медленноменяющимися функциями по сравнению с косинусоидальной функцией, зависящей от изменения координат отражателей;

2) законы распределения координат отражателей цели x_n, x_i, y_n, y_i являются нормальными с нулевыми средними значениями и дисперсиями $\sigma_{x_n} = \sigma_{x_i} = \sigma_x^2, \sigma_{y_n} = \sigma_{y_i} = \sigma_y^2$, при этом $\sigma_x = \bar{L}_x, \sigma_y = \bar{L}_y$ – усредненные размеры РЦ;

3) угол разноса РЛС β – небольшой и данные РЛС наблюдают одинаковое количество отражателей РЦ N .

Таким образом, получаем выражение для нормированного временного коэффициента взаимной корреляции огибающих квадратов амплитуд отраженных от РЦ сигналов, принимаемых 1-й и 2-й РЛС:

$$\begin{aligned}
 & R_{12}(t, \beta) = \\
 & = \frac{1}{N} + \frac{N-1}{N} e^{-2 \left[(2m_2 - 2m_1)^2 \bar{L}_x^2 + (2m_2 \beta)^2 \bar{L}_y^2 \right]} \quad (5)
 \end{aligned}$$

Проведенный анализ выражения (5) показывает, что использование только двух разнесенных на местности РЛС не позволит определять продольный и поперечный размеры РЦ при отсутствии информации о количестве ее отражателей. Однако, этого недостатка можно избежать при использовании трех разнесенных на местности РЛС, работающих на трех разных частотах (f_1, f_2, f_3) одного диапазона волн. Действительно, используя выражение (5), можно получить систему трех независимых уравнений с тремя неизвестными \bar{L}_x, \bar{L}_y, N в виде:

$$\begin{aligned}
 & R_{12}(t, \beta_{12}) = \frac{1}{N} + \frac{N-1}{N} e^{-2 \left[4(\Delta m_{12})^2 \bar{L}_x^2 + 4m_2^2 \beta_{12}^2 \bar{L}_y^2 \right]}, \\
 & R_{13}(t, \beta_{13}) = \frac{1}{N} + \frac{N-1}{N} e^{-2 \left[4(\Delta m_{13})^2 \bar{L}_x^2 + 4m_3^2 \beta_{13}^2 \bar{L}_y^2 \right]}, \quad (6) \\
 & R_{22}(t, \beta_{23}) = \frac{1}{N} + \frac{N-1}{N} e^{-2 \left[4(\Delta m_{23})^2 \bar{L}_x^2 + 4m_3^2 \beta_{23}^2 \bar{L}_y^2 \right]},
 \end{aligned}$$

где $\Delta m_{12}, \Delta m_{13}, \Delta m_{23}$ – разность волновых чисел для соответствующих РЛС.

Измеряя значение коэффициентов корреляции и значение величин m_1, m_2 и m_3 , а также углов разности РЛС ($\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}$), из системы уравнений (6) можно определить средние продольный и поперечный размеры (\bar{L}_x, \bar{L}_y) и количество отражателей (N) РЦ на интервале наблюдения.

Однако, решение данной системы уравнений представляет довольно сложную задачу.

Рассмотрим более частный случай, когда на РЦ находится большое количество отражателей ($N \gg 1$ – это справедливо для большинства воздушных РЦ в миллиметровом или сантиметровом диапазонах волн). В этом случае из выражений (6) получим систему двух независимых уравнений с двумя неизвестными \bar{L}_x, \bar{L}_y в виде:

$$\begin{aligned}
 & R_{12}(t, \beta_{12}) = e^{-8 \left[(\Delta m_{12})^2 \bar{L}_x^2 + m_2^2 \beta_{12}^2 \bar{L}_y^2 \right]}, \\
 & R_{13}(t, \beta_{13}) = e^{-8 \left[(\Delta m_{13})^2 \bar{L}_x^2 + m_3^2 \beta_{13}^2 \bar{L}_y^2 \right]},
 \end{aligned}$$

решая которую, получим выражения для определения средних на интервале наблюдения продольного и поперечного размеров РЦ:

$$\begin{aligned}
 & \bar{L}_x = \sqrt{\frac{m_2^2 \beta_{12}^2 \ln R_{13}(t, \beta_{13}) - m_3^2 \beta_{13}^2 \ln R_{12}(t, \beta_{12})}{8 \left[(\Delta m_{12})^2 m_3^2 \beta_{13}^2 - (\Delta m_{13})^2 m_2^2 \beta_{12}^2 \right]}}, \\
 & \bar{L}_y = \sqrt{\frac{(\Delta m_{13})^2 \ln R_{12}(t, \beta_{12}) - (\Delta m_{12})^2 \ln R_{13}(t, \beta_{13})}{8 \left[(\Delta m_{12})^2 m_3^2 \beta_{13}^2 - (\Delta m_{13})^2 m_2^2 \beta_{12}^2 \right]}}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Используя выражение (7) можно разработать структурную схему канала определения усредненных на интервале наблюдения продольного и поперечного размеров РЦ.

Схема канала изображена на рисунке 1.

В состав данного канала входят три РЛС, две из которых вынесены относительно первой РЛС на углы β_{12} и β_{13} соответственно.

С выходов каждой РЛС видеоимпульсы отраженных от РЦ сигналов поступают на схемы выделения огибающих амплитуд, которые формируют на определенном временном интервале огибающие амплитуд, получаемые за счет изменения ориентации РЦ при полете.

В дальнейшем в соответствующих схемах усреднения осуществляется приведение данных огибающих к квазистационарному виду [3]. Затем эти огибающие поступают на соответствующие измери-

тели, которые формируют значения коэффициентов корреляции R_{12} и R_{13} . С выходов данных измерителей соответствующие напряжения поступают на входы устройства определения размеров РЦ. Одновременно с этим на другие входы устройства определения размеров РЦ с соответствующих измерителей подаются напряжения, характеризующие величины углов разноса β_{12} и β_{13} . Данные величины измеряются с использованием напряжений, определяющих дальности до РЦ от РЛС 1, РЛС 2 и РЛС 3, а также величины расстояний между этими РЛС.

Расчеты производятся на основании теоремы косинусов [7].

Устройство определения размеров функционирует в соответствии с выражениями (7).

Рассмотрим в дальнейшем возможности реализации данного метода с использованием экспериментальных данных.

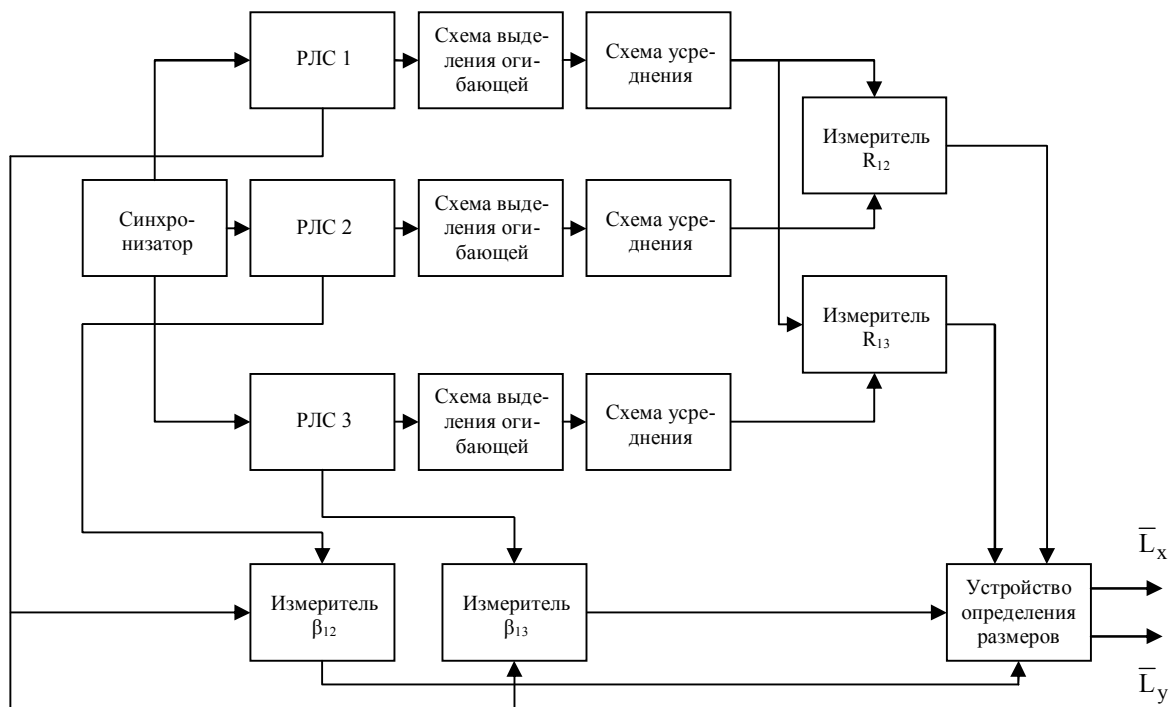


Рис. 1. Структурная схема канала измерения средних продольного и поперечного размеров РЦ

При проведении расчетов были использованы экспериментальные реализации амплитуд рассеянных воздушными РЦ сигналов бомбардировщика В-1 и истребителя МИГ-21 при углах разноса трех РЛС $\sim 1,5^\circ$, работающих на частотах 9450 МГц, 9600 МГц и 9750 МГц [8, 9].

Интервал усреднения при расчетах нормированных коэффициентов взаимной корреляции составлял от 0° до 30° .

По данным реализациям в соответствии с выражениями (7) были рассчитаны величины средних продольного и поперечного размеров этих РЦ. Од-

новременно аналогичные величины были получены теоретическим путем с использованием чертежей данных самолетов.

Полученные результаты величин средних продольных и поперечных размеров, а также ошибок их определения представлены в табл. 1.

Данные табл. 1 подтверждают достаточно высокую точность использования разработанного метода и реализующего его устройства определения усредненных размеров РЦ по данным разнесенных на местности трех РЛС, работающих на трех различных частотах.

Таблица 1

Результаты расчетов усредненных продольного и поперечного размеров целей, полученные теоретическим и экспериментальным путем

Тип цели	Значения, полученные по экспериментальным данным		Значения, полученные теоретическим путем		Ошибки определения размера	
	$\bar{L}_{x, \text{эксп.}}, \text{ м}$	$\bar{L}_{y, \text{эксп.}}, \text{ м}$	$\bar{L}_{x, \text{теор.}}, \text{ м}$	$\bar{L}_{y, \text{теор.}}, \text{ м}$	$\delta L_x, \%$	$\delta L_y, \%$
В-1	46,26	25,19	42,63	22,68	8,5	11,1
МИГ-21	11,49	7,29	12,8	6,81	6,8	7,2

Выводы

Таким образом, разработаны метод определения усредненных продольного и поперечного размеров воздушной радиолокационной цели и устройство, реализующее этот метод.

Полученные разработки позволяют определить с высокой точностью размеры РЦ с использованием трех разнесенных на местности РЛС, работающих на трех различных частотах.

Список литературы

1. Небабин В.Г. Методы радиолокационного распознавания / В.Г. Небабин, В.В. Сергеев. – М.: Радио и связь, 1984. – 152 с.
2. Казаков Е.Л., Метод определения геометрических характеристик радиолокационных целей при использовании простых сигналов / Е.Л. Казаков, Д.Г. Васильев // Прикладная радиоэлектроника. – Х.: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2002. – №1. – Т. 1. – С. 83 – 88.
3. Распознавание целей при многочастотной локации / Е.Л. Казаков, В.Б. Бзот, Д.Г. Васильев, А.Е. Казаков, А.И. Коваленко; под ред. Е.Л. Казакова. – МО Украины. – Х.: ОНИИ, 2007. – 187 с.

4. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование / Я.Д. Ширман, С.А. Горшков, С.П. Леценко, Г.А. Братченко // Зарубежная радиоэлектроника, 1996. – №11. – С. 3 – 64.

5. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов / Под. ред. Л.Т. Тучкова. – М.: Радио и связь, 1985. – 236 с.

6. Радиолокационные системы: основы построения и теория / Под. ред. Я.Д. Ширмана. Справочник. – М.: Радиотехника, 2007. – 510 с.

7. Корн Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн; пер. с англ. – М.: Наука, 1973. – 100 с.

8. Характеристики рассеяния радиолокационных целей / Е.Л. Казаков, А.В. Сторожук; под. ред. Е.Л. Казакова. – Х.: АСС СПДФО, 2006. – 186 с.

9. Распознавание воздушных целей по сигнальной информации в однопозиционных и многопозиционных локаторах / Е.Л. Казаков, А.Е. Казаков, А.В. Коломийцев, К.В. Садовый; под ред. Е.Л. Казакова. – Х.: Миськдрук, 2015. – 459 с.

Поступила в редколлегию 19.03.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.И. Сухаревский, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

МЕТОД І ПРИСТРІЙ ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ЦІЛІ ПО ОГІНАЮЧИМ АМПЛІТУД ВІДБИТИХ СИГНАЛІВ, ЩО ПРИЙМАЮТЬСЯ НА РІЗНИХ ЧАСТОТАХ ТРЬОМА РОЗНЕСЕНИМИ НА МІСЦЕВОСТІ РАДІОЛОКАЦІЙНИМИ СТАНЦІЯМИ

Є.Л. Казаков, О.В. Коломійцев, С.І. Клівець, О.С. Петренко

Розроблені метод визначення усереднених подовжнього і поперечного розмірів радіолокаційної цілі (РЦ) і пристрій, що реалізує цей метод. Отримані вирази для визначення нормованих часових коефіцієнтів взаємної кореляції огинаючих квадратів амплітуд відбитих сигналів, що приймаються трьома рознесеними на місцевості радіолокаційними станціями (РЛС), працюючими на трьох різних частотах. Показано, що при проведенні відповідної обробки цих коефіцієнтів взаємної кореляції можуть бути визначені усереднені подовжній і поперечний розміри РЦ, що спостерігається. Запропонована структурна схема і розкритий принцип роботи пристрою, що реалізує запропонований метод. Проведена експериментальна перевірка цього методу.

Ключові слова: радіолокаційна ціль, коефіцієнт взаємної кореляції огинаючих амплітуд, подовжній і поперечний розміри РЦ, рознесені на місцевості РЛС.

METHOD AND DEVICE OF DETERMINING SIZE OF RADIO-LOCATION AIM ON CIRCUMFLEX THE AMPLITUDES OF THE REFLECTED SIGNALS, ACCEPTED ON DIFFERENT FREQUENCIES BY SET ABOUT THREE ON LOCALITY RADIO-LOCATION STATIONS

E.L. Kazakov, O.V. Kolomitsev, S.I. Klevets, A.S. Petrenko

Worked out method of determination averaged longitudinal and transversal sizes of radiolocation aim (RA) and device realizing this method. Got expression for determination of the rationed temporal coefficients of cross-correlation of circumflex squares of amplitudes of the reflected signals, accepted by set about three on locality radio-location stations (RLS) working on three different frequencies. It is shown that during realization of corresponding treatment of these coefficients of cross-correlation can be certain averaged longitudinal and transversal sizes of looked after RA. A flow diagram is offered and principle of work of device realizing the offered method is exposed. Experimental verification of this method is conducted.

Keywords: radiolocation aim, coefficient of cross-correlation of circumflex amplitudes, longitudinal and transversal the sizes of RA, carried on locality RLS.