

УДК.621.37

Н.Д. Рысаков, И.В. Титов, С.А. Макаров

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

**АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ МНОГОТОЧЕЧНЫХ ЦЕЛЕЙ**

*Работа посвящена анализу зависимости эффективной отражающей поверхности (ЭОП) многоточечной цели и ее автокорреляционной функции от частоты сигналов облучения. Такой анализ выполнен методом расчета ЭОП и автокорреляционной функции на основе упрощенной модели цели и уточнения зависимостей по результатам расчета. Необходимость такого анализа обусловлена тем, что в литературе и справочниках по теории радиолокации недостаточно конкретизируется зависимость характеристик ЭОП цели от частотного разнеса сигналов одновременного облучения. В результате выполнения работы удалось конкретизировать рекомендации по частотному разнесу сигналов в РЛС с многочастотным зондирующим сигналом для решения типовых задач первичной радиолокации.*

**Ключевые слова:** эффективная отражающая поверхность, блестящие точки, многоточечная цель, автокорреляционная функция, коэффициент корреляции, частота сигнала облучения.

**Введение**

**Постановка проблемы.** Для решения определенных задач радиолокации необходимо знать зависимость отражающей способности объекта от частоты зондирующего сигнала. Так, например, такие сведения нужны при оценке точности измерения высоты цели в РЛС с многочастотным зондирующим сигналом и парциальной диаграммой направленности (ПДН) или при реализации многочастотного зондирующего сигнала для увеличения дальности действия РЛС.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В различной литературе по теории радиолокации, как, например, [1 – 4] недостаточно конкретизируется зависимость эффективной отражающей поверхности (ЭОП) цели от частотного разнеса сигналов при одновременном облучении. Действительно, согласно [1] для понижения вероятности “нулевого приема” при облучении цели сигналами на двух частотах  $f_1$  и  $f_2$  необходимо соблюдать условие:

$$|f_1 - f_2| \geq C/2l_{ц}, \quad (1)$$

где  $C$  – скорость света;  $l_{ц}$  – протяженность цели по направлению облучения.

В справочнике [4] приводятся несколько графиков корреляционных функций отраженных сигналов при облучении целей типовых размеров протяженными импульсами на разных несущих частотах. На основе этих графиков, полученных по результатам детального моделирования, делается вывод о том, что ширина первых лепестков корреляционных функций тем уже, чем больше протяженность цели. В пособии [5], представляющем обзор материалов зарубежной печати до 1984 г., подчеркиваются значительные отличия зависимостей ЭОП объектов разных форм от длины волны, и поэтому излагаются общие принципы распознавания объектов по зависимости их ЭОП

от частоты сигналов облучения.

**Формулирование целей статьи.** Представляет практический интерес получения расчетных соотношений, позволяющих характеризовать статистическую зависимость ЭОП цели от частотного разнеса сигналов.

**Изложение основного материала**

По мнению авторов, статистическую зависимость ЭОП цели от частотного разнеса сигналов можно уточнить на основе упрощенных расчетов. Для этого представим цель набором блестящих точек с различной “яркостью” отражения, по разному удаленных друг от друга. Каждый “набор точек” можно рассматривать как параметры определенной цели для фиксированного ракурса облучения. Уяснение зависимости ЭОП той же цели от частоты при другом ракурсе облучения будем осуществлять методом определенного изменения параметров точек при одних и тех же длине  $l_{ц}$  и числе  $n$  блестящих точек цели. Для каждого такого набора точек проведем расчет зависимостей амплитуды ЭОП и значений ее автокорреляционной функции от частоты в нужном диапазоне частот. Очевидно, что такой подход к представлению ЭОП цели можно рассматривать как некоторый эквивалент изменений ЭОП в ограниченном секторе углов облучения, соответствующем примерно одним и тем же параметрам цели –  $l_{ц}$  и  $n$ .

Для расчета зависимости нормированной амплитуды ЭОП  $e_{ц}(f_c)$   $n$ -точечной цели от частоты сигнала облучения  $f_c$  воспользуемся формулой:

$$e_{ц}(f_c) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n E_i} \left( \left( \sum_{i=1}^n E_i \sin \phi_i(f_c) \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^n E_i \cos \phi_i(f_c) \right)^2 \right)^{0,5}, \quad (2)$$

где  $E_i$  – амплитуда ЭОП  $i$ -й точки;  $\phi_i(f_c) = \frac{4\pi\Delta l_i}{C} f_c$ ;  
 $\Delta l_i$  – удаление  $i$ -й точки цели относительно первой;  
 $f_c$  – частота сигнала облучения;  
 $n$  – число точек цели.

Очевидно, что  $\Delta l_1 = 0$  и  $\Delta l_n = l_{ц}$ .

Результаты расчета функции (2) для двух диапазонов частот приведены в форме графиков на рис. 1.

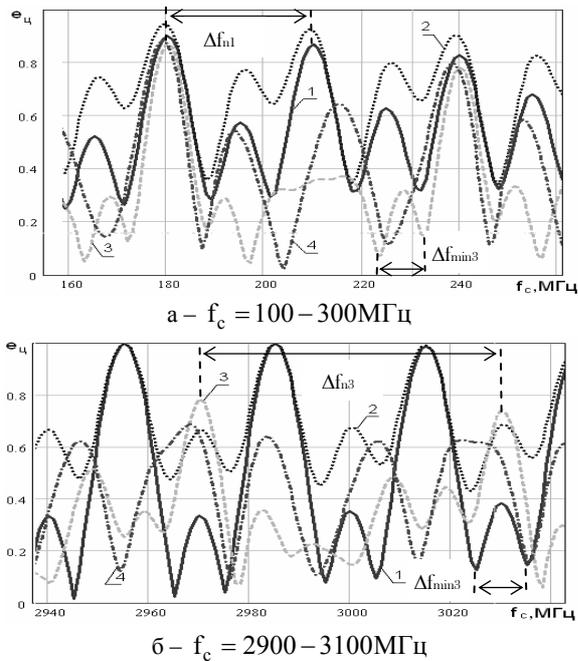


Рис. 1. Зависимость ЭОП от частоты зондирующего сигнала для случаев:

- 1 –  $n=3$ ;  $\Delta l_i = 0, 5, 127, 10$  м;  $E_i = 1$  ;
- 2 –  $n=3$ ;  $\Delta l_i = 0, 5, 127, 10$  м;  $E_i = 4, 1, 1$ ;
- 3 –  $n=7$ ;  $\Delta l_i = 0, 2, 477, 5, 151, 7, 477, 10, 117, 12, 471, 15$  м;  
 $E_i = 1$  ;
- 4 –  $n=7$ ;  $\Delta l_i = 0, 2, 477, 5, 151, 7, 477, 10, 117, 12, 471, 15$  м;  
 $E_i = 1, 4, 1, 1, 4, 1, 1$

Из представленных графиков видно:

1. Зависимость амплитуды ЭОП от частоты носит осциллирующий характер, а скорость и амплитуда осцилляций зависит от параметров цели и длины волны облучения.

2. В каждом графике для целей без доминирующих точек ( $E_i = 1$ ) можно заметить наличие лепестков двух размеров (графики 1, 3): “узких” и “широких” (удвоенной ширины). Широкие лепестки амплитуды ЭОП повторяются в среднем с частотным сдвигом  $\Delta f_n$  на частотах  $f_m$ , связанных со средним взаимным удалением блестящих точек цели следующим образом:

$$\Delta f_n \approx C(n-1)/2l_{ц},$$

$$f_m = m\Delta f_n, \quad m=1,2,3, \quad (3)$$

3. Минимальные значения амплитуды ЭОП на отрезках  $\Delta f_n$  относительно  $f_m$  принимает с дискретом  $f_{min}$ , связанным с линейным размером и количеством точек цели следующим образом:

$$\Delta f_{min} = \Delta f_n / n = C(n-1)/(2l_{ц}n). \quad (4)$$

4. Наличие у цели одной из  $n$  “яркой” точки (график 2) изменяет среднее значение и глубину осцилляций амплитуды ЭОП, а наличие двух ярких точек (графики 4) может приводить к раздвоению или к слиянию отдельных лепестков.

Для описания автокорреляционных функций  $R(\delta f)$  амплитуд ЭОП рассматриваемых моделей целей находим среднее значение  $e_{цср}$  амплитуды ЭОП (2) и значение дисперсии  $R(0)$  в исследуемом диапазоне частот от  $f_n$  до  $f_k$

$$e_{цср} = \frac{1}{f_k - f_n} \int_{f_n}^{f_k} e_{ц}(f_c) df_c;$$

$$R(0) = \int_{f_n}^{f_k} (e_{ц}(f_c) - e_{цср})^2 df_c,$$

$$f_{ср} = 0,5(f_n + f_k).$$

Тогда нормированное значение  $r(\delta f)$  функции  $R(\delta f)$  представим в виде:

$$r(\delta f) = \frac{1}{R(0)} \cdot \int_{f_n}^{f_k} (e_{ц}(f_c) - e_{цср}) \times (e_{ц}(f_c - \delta f) - e_{цср}) df_c \quad (5)$$

Расчет значений функций (2) и (5) проведем для двух названных частотных диапазонов и двух вариантов значений  $E_i$ :  $E_i = 1$  и  $E_i \neq const$ .

Количественную оценку степени корреляции амплитуд отраженных сигналов проведем путем усреднения семейства  $N$  частных нормированных автокорреляционных функций ( $N=25$ ) целей, имеющих одинаковую протяженность цели и количество блестящих точек, согласно следующему выражению:

$$r(\delta f) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N r^j(\delta f), \quad (6)$$

где  $r^j(\delta f)$  –  $j$ -ая автокорреляционная функция, полученная по формуле (5) для определенного набора значений  $\Delta l_i$  и  $E_i$ .

Полученные значения  $r(\delta f)$  для вариантов  $E_i = 1$  и  $E_i \neq const$  позволили убедиться в том, что незначительное (до 5дБ) различие  $E_i$  точек цели по сравнению с  $E_i = const$  приводит лишь к увеличению в 1,5 – 2 раза “боковых” лепестков автокорреляционной функции. Поэтому полученные графики  $r(\delta f)$  для вариантов  $E_i = 1$  и  $E_i \neq const$  были усреднены и приведены на рис. 2 и 3.

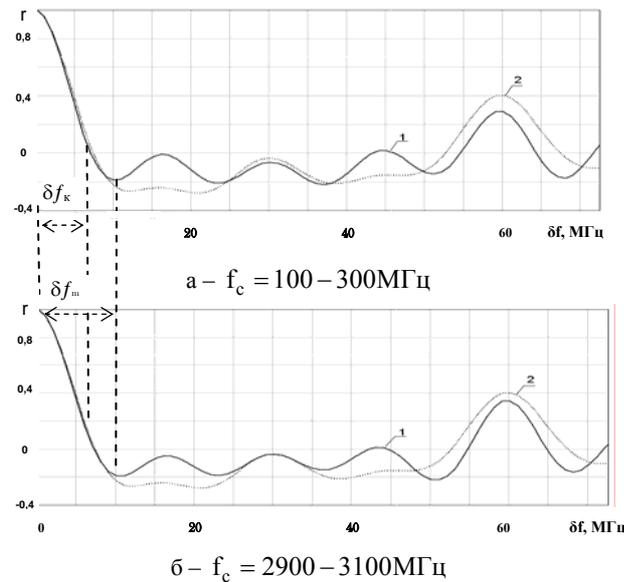


Рис. 2. Усредненные значения автокорреляционных функций для  $l_{ц} = 10 м$ ,  $n=5$ : 1 – реальная; 2 – аппроксимированная

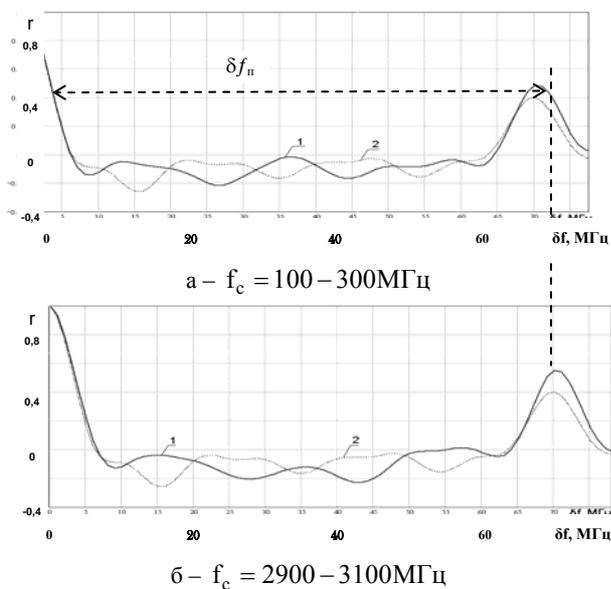


Рис. 3. Усредненные значения автокорреляционных функций для  $l_{ц} = 15 м$ ,  $n=8$ : 1 – реальная; 2 – аппроксимированная

Анализ полученных зависимостей позволил подобрать следующее приближенное выражение  $r^\sigma(\delta f)$  для аппроксимации функции (6):

$$r^\sigma(\delta f) = \exp(-0,29\alpha_k |\delta f|) + \left[ 0,5 \frac{n}{n-1} \left[ \frac{\sin(\alpha_k (2n-1)\delta f)}{(2n-1)\sin(\alpha_k \cdot \delta f)} + \frac{\sin(\alpha (n-k) \cdot \delta f)}{(n-k) \cdot \sin(\alpha \cdot \delta f)} \right] - \frac{1}{n-1} \right], \quad (7)$$

где  $k = 0,5[(-1)^n + 1]$ .

Фазовый коэффициент  $\alpha_k$  выражения (7) характеризует зависимость периодичности осцилляций амплитуды ЭОП при изменении частоты облучения от параметров цели –  $l_{ц}$  и  $n$ . Его можно описать выражением:

$$\alpha_k = \frac{4\pi l_{ц} n}{C(n-1)}. \quad (8)$$

Графики функции (7) приведены на рис. 2 и рис. 3 для указанных параметров целей и диапазонов частот.

Результаты анализа зависимостей, представленных на рис. 1 – 3, позволяют сделать следующие выводы относительно частотных свойств многоточечных целей.

1. Ширина основного лепестка  $\delta f_k$  частотной автокорреляционной функции  $r(\delta f)$  связана с размерами облучаемой цели  $l_{ц}$  и количеством блестящих точек на ней  $n$  зависимостью:

$$\delta f_k \approx \frac{C(n-1)}{3,5l_{ц}n}. \quad (9)$$

При этом автокорреляционная функция принимает первое максимальное отрицательное значение при частотном разnose

$$\delta f_m \approx \frac{C(n-1)}{2,5l_{ц}n}. \quad (10)$$

2. Значения автокорреляционной функции с периодичностью  $\Delta f_n$  (3) существенно возрастает и поэтому при таком частотном разnose сигналов облучения увеличивается вероятность одновременного нулевого приема отражений на этих частотах. Поэтому для понижения вероятности “нулевого приема” на двух частотах  $f_1$  и  $f_2$  условие (1) целесообразно уточнить:

$$\frac{C(n-1) \left(1 - \frac{0,8}{n}\right)}{2l_{ц}} \geq |f_1 - f_2| \geq C(n-1)/(2,5nl_{ц}). \quad (11)$$

3. Для ослабления влияния отличий ЭОП на двух частотах  $f_1$  и  $f_2$  на точность измерения высоты цели методом ПДН в РЛС с многочастотным зондирующим сигналом при условии  $\lambda \ll l_{ц}$  можно ввести ограничения частотного разnose сигналов соседних лепестков ПДН:

$$|f_1 - f_2| \leq \frac{C(n-1)}{6l_{ц}n}. \quad (12)$$

При этом отличия корреляции не будет превышать 10%.

### Выводы

Таким образом, полученные результаты зависимостей амплитуд ЭОП многоточечных целей и их

автокорреляционных функций от частоты облучения на основе упрощенной модели целей (для фиксированных значений  $I_{ц}$ ,  $n$  и незначительных отличиях  $\Delta I_i$ ) позволяют уточнить рекомендации по частотному разнесу сигналов облучения (11,12) при решении определенных радиолокационных задач в РЛС с многочастотным зондирующим сигналом.

Для уточнения справедливости полученных результатов можно провести анализ и оценить изменения параметров  $I_{ц}$ ,  $n$ ,  $E_i$  определенного класса воздушных судов при изменении ракурса облучения. Такие уточнения можно сделать по моделям воздушных судов. На основе этих данных можно уточнить размеры секторов наблюдения цели, для которых близка рассматриваемая модель цели, и в соответствии с выражениями (2), (5) и (6) получить семейство графиков автокорреляционных функций для уточнения рекомендаций (11), (12) частотного разнеса. Здесь же подчеркнем, что полученные рекомендации (11) и (12) по частотному разнесу сигналов одновременного облучения для целей с доминирующими блестящими точками не являются обязательными, поскольку вероятность “нулевого приема” на двух частотах  $f_1$  и  $f_2$  облучения таких целей практически равна нулю.

## Список литературы

1. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации / Я.Д. Ширман, В.Н. Голиков, И.Н. Бусыгин и др.: под ред. Я.Д. Ширмана. – [учебное пособие для вузов]. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.
2. Дудник П.И. Авиационные радиолокационные устройства / П.И. Дудник, Ю.И. Чересов. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1986. – 533 с.
3. Справочник по радиолокации. Редактор М. Скольник. Перевод с английского под общей редакцией К.Н. Трофимова в 4 томах. Том 1: Основы радиолокации. Под редакцией Я. С. Ицхоки. – М.: Советское радио, 1976. – 455 с.
4. Ширман Я.Д. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория. Справочник радиолокации / Я.Д. Ширман, С.Т. Багдасарян, А.С. Маляренко и др.: под ред. Я.Д. Ширмана. – [справочник]. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
5. Небабин В.Г. Методы и техника радиолокационного распознавания / В.Г. Небабин, В.В. Сергеев. – М.: Радио и связь, 1984. – 152 с.

Поступила в редколлегию 27.05.2009

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

## АНАЛІЗ ЧАСТОТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БАГАТОТЧКОВИХ ЦІЛЕЙ

М.Д. Рисаков, І.В. Тітов, С.А. Макаров

*Робота присвячена аналізу залежності ефективної поверхні відбиття (ЕПВ) багатоточкової цілі та її автокорреляційної функції від частоти сигналів опромінення. Такий аналіз виконаний методом розрахунку ЕПВ та автокорреляційної функції на основі спрощеної моделі цілі і уточнення залежностей за результатами розрахунку. Необхідність такого аналізу обумовлена тим, що в літературі та довідниках з теорії радіолокації недостатньо конкретизується залежність характеристик ЕПВ цілі від частотного рознесення сигналів одночасного опромінення. В результаті виконання роботи вдалось конкретизувати рекомендації щодо частотного рознесення сигналів в РЛС з багаточастотним зондуючим сигналом для рішення типових задач первинної радіолокації.*

**Ключові слова:** ефективна поверхня відбиття, блискучі точки, багатоточкова ціль, автокорреляційна функція, коефіцієнт кореляції, частота сигналу.

## THE ANALYSIS OF FREQUENCY PROPERTIES OF THE MULTIDOT PURPOSES

N.D. Risakov, I.V. Titov, S.A. Makarov

*Work is devoted the analysis of dependence of an effective reflecting surface (ERS) to the multidot purpose and its autocorrelation function from frequency of signals of an irradiation. Such analysis is executed by a method of calculation ERS and autocorrelation function on the basis of the simplified model of the purpose and specification of dependences by results of calculation. Necessity of such analysis is caused by that in the literature and directories under the radar-location theory dependence of characteristics ERS of the purpose on a frequency rating of signals of a simultaneous irradiation is insufficiently concretised. As a result of work performance it was possible to concretise recommendations of a frequency rating of signals in radar station with a multifrequency probing signal for the decision of typical problems of a primary radar-location.*

**Keywords:** effective reflecting surface, brilliant points, the multidot purpose, autocorrelation function, correlation factor, frequency of a signal of an irradiation.