

# Перспективные технологии измерения продольного размера целей в многодиапазонном радиолокационном комплексе

А.Д. Бомштейн, П.А. Жигунов

В работе рассмотрены вопросы использования новых радиолокационных технологий адаптивного взаимодействия РЛС разного диапазона волн в задаче измерения продольного размера цели. Предложен способ двухэтапного измерения, позволяющий значительно уменьшить временные затраты на решение задачи.

*Ключевые слова:* радиолокационный комплекс, продольный размер цели, многочастотный сигнал.

## 1. Введение

В настоящее время всё большее распространение получают новые радиолокационные технологии, заключающиеся в комплексировании в единый радиолокационный комплекс РЛС разного диапазона волн. Адаптивное взаимодействие РЛС разного диапазона позволяет улучшить целый ряд основных параметров и обеспечить более эффективное решение возлагаемых на РЛС задач.

Одной из таких задач, позволяющих повысить качество радиолокационной информации, является измерение продольного размера воздушного объекта, который используется в качестве сигнального признака для увеличения вероятности правильного распознавания некоторых классов обнаруженных целей, таких как самолеты тактической и стратегической авиации.

Один из известных способов оценки продольного размера заключается в облучении цели многочастотным сигналом с последующим анализом полученного частотного портрета цели.

## 2. Оценка продольного размера цели с использованием многочастотного сигнала

Частотный портрет представляет собой зависимость эффективной площади рассеивания (ЭПР) цели от частоты зондирующего сигнала и в приближении геометрической теории дифракции описывается выражением [1]:

$$\sigma(f) = \sum_{i=1}^n \sigma_i + 2 \sum_{i>j}^n \sqrt{\sigma_i \sigma_j} \cos\left(\frac{4\pi l_{ij}}{c} f \cos \beta\right), \quad (1)$$

где  $\sigma_i$  – ЭПР  $i$ -й блестящей точки цели,  $l_{ij}$  – расстояние между двумя заданными «блестящими точками»,  $f$  – частота зондирующего сигнала,  $\beta$  – ракурсный угол.

Для определения размеров воздушного объекта (ВО) при некогерентном многочастотном зондировании используется несколько методов, в частности, метод измерения интервала корреляции по частоте. При этом, если задаваться равномерным распределением рассеивателей по цели, интервал корреляции определится как [2]:

$$f_c = \frac{c}{2L_r}, \quad (2)$$

где  $L_r$  – продольный размер цели,  $c$  – скорость света. В случае гауссовского и марковского распределения рассеивателей по цели  $f_{cg} = 0.7f_c$ .

Необходимо отметить, что для получения однозначного частотного портрета цели при многочастотном зондировании шаг по частоте должен выбираться исходя из теоремы Котельникова, то есть должен быть не менее чем в 2 раза меньше минимального периода функции  $\sigma(f)$ . Так, при шаге по частоте, равном 1.0 МГц, максимальный однозначно измеряемый продольный размер цели будет составлять 74.9 м. Минимальный измеряемый продольный размер цели определяется диапазоном частотной перестройки (рабочей полосой) РЛС при излучении многочастотного зондирующего сигнала.

Таким образом, требуемое число рабочих частот  $M$  определяется как:

$$M = \frac{2L_{\max}}{L_{\min}} + 1, \quad (3)$$

где  $L_{\max}$  и  $L_{\min}$  – максимальный и минимальный продольные размеры, соответственно. При этом максимально возможное число рабочих частот  $N$ , которое может использоваться для измерения продольного размера в данной РЛС:

$$N = \frac{\Delta F}{\Delta f} + 1, \quad (4)$$

где  $\Delta F$  – диапазон перестройки по частоте,  $\Delta f$  – шаг по частоте.

Для определения продольного размера цели по её частотному портрету может применяться также обратное преобразование Фурье от функции  $A^2(f)$ , пропорциональной зависимости ЭПР воздушного объекта от частоты зондирующего сигнала. При этом шаг перестройки частоты РЛС  $\Delta f$  определяет предельный размер, который может быть оценён с помощью преобразования Фурье, так как при Фурье-анализе ограниченных массивов происходит «размывание» спектральных составляющих (в нашем случае – «блестящих точек»), и хороших результатов удастся добиться при размере реализации  $A^2(f)$  не менее периода интервала частотной корреляции.

Альтернативным алгоритмом, способным работать при минимальном размере реализации  $A^2(f)$ , меньшем, чем интервал частотной корреляции, может быть алгоритм измерения «среднеквадратического размера» ВО, предложенный Я. Д. Ширманом [1]:

$$L = K \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\frac{1}{M-1} \sum_{i=2}^M \left( \frac{A_i^2 - A_{i-1}^2}{M} \right)^2}{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M A_i^4}}, \quad (5)$$

где  $M$  – число частот,  $A_i^2$  – квадраты амплитуд, соответствующих значениям частот  $f_i$ ,  $c$  – скорость света,  $K$  – коэффициент.

При заданном диапазоне измеряемых размеров воздушных объектов расчёт «среднеквадратического размера» позволяет заметно уменьшить количество используемых рабочих точек, однако при этом уменьшается точность измерения.

Таким образом, поскольку размер цели заранее не известен, её приходится облучать в большом диапазоне частот с мелким шагом по частоте, что для диапазона изменения продольного размера от 47 м (самолет стратегической авиации) до 4 м (авиационная ракета) по-

требует 24 рабочих частот с шагом изменения частоты 1.6 МГц. При этом для получения достоверной оценки необходимо обеспечить определённое и достаточно большое отношение сигнал/шум на каждой частоте в процессе облучения цели многочастотным сигналом. В ходе математического моделирования, проведённого при выполнении ряда ОКР по созданию РЛС, было определено, что для однозначно измерения продольного размера требуется отношение сигнал/шум порядка 18 дБ.

Таким образом, для решения задачи распознавания класса цели с использованием продольного размера на требуемых рубежах, задаваемых обычно как 0.8 от дальности обнаружения, многофункциональной РЛС (МРЛС) требуются значительные временные ресурсы, снижающие возможности по реализации других режимов работы и эффективность функционирования МРЛС в целом.

### 3. Измерение продольного размера цели в многодиапазонном комплексе

Временные затраты МРЛС коротковолнового диапазона на измерение продольного размера цели могут быть значительно уменьшены при её работе в составе многодиапазонного радиолокационного комплекса (РЛК) [3]. В таком РЛК задачи обнаружения и сопровождения целей разделены между РЛС длинноволнового диапазона, работающей в режиме поиска, и РЛС коротковолнового диапазона, работающей в режиме сопровождения. Новейшие технологии обзора и обработки информации в таком РЛК позволяют решить задачу измерения продольного размера цели более эффективным, с точки зрения временных затрат, способом.

Так, в таком РЛК может быть реализовано двухэтапное измерение продольного размера цели, при котором на первом этапе РЛС длинноволнового диапазона непосредственно в процессе поиска целей без дополнительных временных затрат может осуществить «грубую» оценку продольного размера и сформировать признак «малоразмерная цель», «среднеразмерная цель» и «крупноразмерная цель».

Указанный признак позволяет на втором этапе, который реализует МРЛС коротковолнового диапазона, выбрать оптимальный диапазон рабочих частот и шаг по частоте. Так, для малоразмерной цели выбирается большой диапазон перестройки по частоте с крупным шагом изменения частоты, а для крупноразмерной цели, наоборот, – небольшой диапазон перестройки по частоте с мелким шагом по частоте. В обоих случаях количество частот, используемых для измерения продольного размера, и, соответственно, затрачиваемое на это время могут быть существенно уменьшены. Возникающая при этом экономия временных ресурсов может быть использована МРЛС для реализации других специальных режимов, позволяющих улучшить качество радиолокационной информации.

Можно показать, что для такой оценки РЛС длинноволнового диапазона достаточно излучать не более двух рабочих частот, например, при поимпульсной перестройке частоты. Так, в [4] предложен двухчастотный способ оценки продольного размера цели, основанный на сравнении среднего значения обобщённого параметра рассеяния и приёма и средней ЭПР цели. В основу этого метода положено понятие коэффициента относительной протяжённости цели по дальности, введённое профессором Я.Д. Ширманом, а также понятие обобщённого параметра рассеяния и приёма. Обобщённым параметром рассеяния и приёма  $W(K)$  с точностью до постоянного множителя производится аналитическое описание амплитуды отклика (АО) согласованного приёмника на рассеянный целью сигнал. Это позволяет связать АО с характеристиками радиолокационной цели (число, интенсивность и положение её локальных центров рассеяния относительно кажущегося центра цели по дальности), с характеристиками зондирующего сигнала (несущая частота, ширина и форма спектра или вид автокорреляционной функции), а также с характером обработки отражённого сигнала.

Процедуру описания с помощью обобщённого параметра рассеяния и приёма рассматривают как процедуру нахождения реакции системы, состоящей из последовательно соединённых линейных фильтров (фильтра цели и частотной характеристики приёмного устройства) на зондирующий сигнал с известной формой спектра. В результате такой процедуры получается значение амплитуды отклика фильтра, согласованного со спектром зондирующего сигнала, с учётом накопления рассеянного сигнала в приёмнике. Амплитуду принятого сигнала рассматривают на выходе устройства обработки, проводящего операцию вычисления квадрата модуля суммы спектральных составляющих отражённого двухчастотного зондирующего сигнала, которая в общем виде описывается выражением:

$$W(K) = \left| \frac{Q}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |S(j\omega)|^2 K(j\omega) d\omega \right|^2, \quad (6)$$

где  $S(j\omega)$  – спектральная плотность зондирующего сигнала,  $K=L/\delta D$  – коэффициент относительной протяжённости цели по дальности,  $L$  – радиальный размер цели,  $\delta D=c/2\Delta f$  – элемент разрешения по дальности, обеспечиваемый сигналом с шириной спектра  $\Delta f$ ;  $Q$  – нормирующий коэффициент, производящий нормировку спектральной плотности зондирующего сигнала к единице,  $K(j\omega)$  – нормированная частотная характеристика цели,  $\omega$  – круговая частота.

Вследствие этого, при облучении цели одновременно сигналами на 2-х частотах, амплитуда сигнала на выходе приёмного устройства, вычисляющего квадрат модуля суммы составляющих спектра сигналов, может быть записана в виде:

$$W(K) = \sum_{i=1}^N \sigma_i \cos^2 \left( \pi K \left( 1 + \nu - \frac{2\Delta r_i}{L} \right) \right) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \sqrt{\sigma_i \sigma_j} \cos \left( \frac{4\pi f_0}{c} \right) \cos \left( \pi K \left( 1 + \nu - \frac{2\Delta r_i}{L} \right) \right), \quad (7)$$

где

$\sigma_i$  – величины ЭПР соответствующих локальным центрам рассеяния;

$\Delta f$  – разнос частот в спектре сигнала;

$L$  – расстояние между крайними отражателями поверхности цели в радиальном направлении;

$c$  – скорость распространения электромагнитной волны;

$N$  – количество локальных центров рассеяния;

$\Delta r_i$  – расстояние до  $i$ -го центра рассеяния относительно первого;

$f_0$  – средняя частота двухчастотного сигнала;

$\nu$  – относительное смещение кажущегося центра цели.

Мгновенное значение параметра рассеяния  $W(K)$  носит случайный характер, определяемый случайными начальными фазами на частоте  $f_0$ , соответственно значения второго слагаемого выражения (7) равномерно распределено на интервале  $[-1, 1]$ . Отсюда очевидно, что при усреднении по нескольким независимым реализациям второе слагаемое будет стремиться к нулю. В результате среднее значение амплитуды отклика согласованного приемника может быть записано в следующем виде:

$$\overline{W(K)} = \sum_{i=1}^N \sigma_i \cos^2 \left( \frac{2\pi\Delta f}{c} L(1 + \nu) - 2\Delta r_i \right). \quad (8)$$

В качестве признака оценки радиального размера цели выступает отношение  $k$

$$k = \frac{\overline{W(K)}}{\sigma}. \quad (9)$$

Коэффициент  $K$  относительной протяжённости цели по дальности демонстрирует зависимость признака распознавания  $k$  от соотношения  $\Delta f$  и  $\Delta r_i$  и показывает его чувствительность к радиальному размеру цели при фиксированном разноре частот.

На рис. 2 показана зависимость признака распознавания от разноре частот двухчастотного сигнала для характерных представителей трёх классов воздушных целей: малой (крылатая

ракета «BGM-109 Tomahawk»), средней (истребитель «F-16») и большой (бомбардировщик «B-1B») протяженности, полученные в результате математического моделирования.

Из рисунка видно, что разность между соседними частотами порядка 2 – 2.5 МГц (характерная для сетки частот РЛС длинноволнового диапазона) позволяет в рассматриваемом двухчастотном способе оценки продольного размера сформировать требуемый признак размерности цели. Для проверки достоверности распознавания целей двухчастотным способом было проведено математическое моделирование с последующим сопоставлением результатов моделирования. Моделирование проводилось на математической модели, специально разработанной для решения подобного рода задач, которая позволяет получить координаты локальных центров рассеяния воздушных целей на различных ракурсах. Для вычисления интенсивности и координат локальных центров рассеяния реальная геометрия воздушной цели представлялась набором facets (рис. 3).

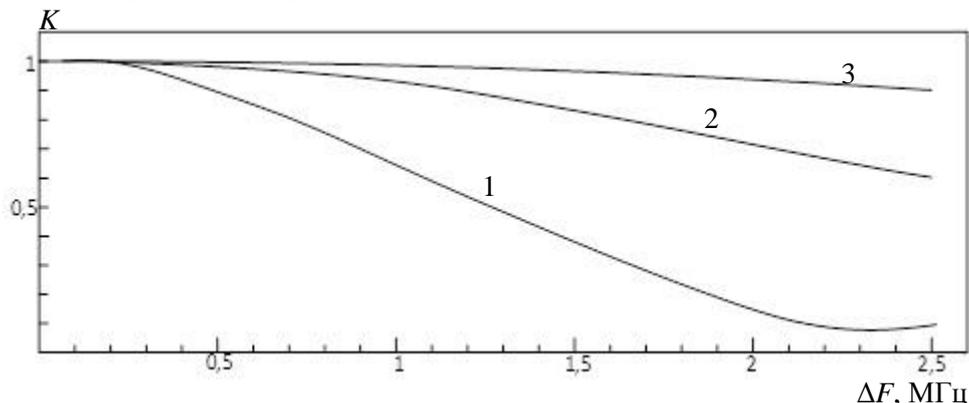


Рис. 2. Зависимость признака распознавания от разности частот для двухчастотного способа распознавания воздушных целей (1 – цель типа «B-1B», 2 – цель типа «F-16», 3 – цель типа «BGM-109»)

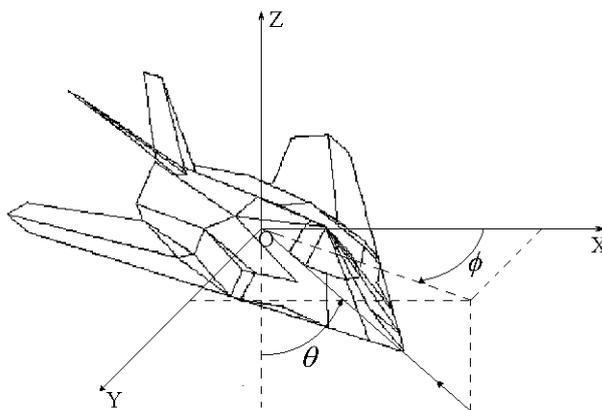


Рис. 3. Фасетное представление поверхности самолета «F-117A»

Достоверность результатов моделирования была подтверждена в ходе полунатурного эксперимента при использовании сигналов РЛС дежурного режима, работающей в метровом диапазоне длин волн. При этом были получены признаки распознавания для двух самолётов Як-52 и Ан-26 [5]. Была проведена оценка влияния отношения сигнал/шум на достоверность распознавания и показано, что в случае усреднения по ограниченной выборке достаточно иметь порядка 10 – 20 независимых откликов от цели на двух частотах при различных её реализациях (например, в 10 – 20 соседних периодах обзора РЛС). При усреднении по этим обзорам оценка признака размерности цели («малоразмерная цель», «среднеразмерная цель» или «крупноразмерная цель») может быть получена на дальности, не превышающей 0.8 дальности обнаружения.

Указанный признак делит все цели на три поддиапазона и используется МРЛС коротковолнового диапазона на втором этапе предложенного в статье двухэтапного способа измерения продольного размера для выбора оптимального диапазона изменения частоты и шага по

частоте, которые определяются соответственно размерами меньшей и большей из распознаваемых целей этого поддиапазона:

$$\Delta F \geq \frac{c}{4L_{\min}}, \quad (10)$$

$$\Delta f \leq \frac{c}{4L_{\max}}, \quad (11)$$

где  $L_{\max}$  и  $L_{\min}$  – продольные размеры большей и меньшей из распознаваемых целей данного поддиапазона. Количество соответствующих каждому диапазону частотных точек приведены в табл. 1.

Из таблицы видно, что количество частот, используемых для измерения продольного размера, и, соответственно, затрачиваемое на это время могут быть существенно уменьшены не менее чем в 3 раза. Возникающая при этом экономия временных ресурсов может быть использована МРЛС для реализации других специальных режимов, позволяющих улучшить качество радиолокационной информации.

Таблица 1

Признак размера	Малоразмерная	Среднеразмерная	Крупноразмерная
Продольные размеры, м	4 – 16	17 – 30	31 – 47
$\Delta F$ , МГц	37.5	8.8	4.8
$\Delta f$ , МГц	4.69	2.5	1.59
Количество частот	8	4	2

#### 4. Заключение

Таким образом, реализация новых радиолокационных технологий адаптивного взаимодействия РЛС разного диапазона волн позволяет значительно повысить эффективность РЛС коротковолнового диапазона при решении задачи измерения продольного размера цели. В работе предложен способ двухэтапного решения задачи измерения продольного размера, позволяющий значительно уменьшить временные затраты на её реализацию.

#### Литература

1. Ширман Я.Д. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование// Зарубежная радиоэлектроника – 1996, № 11, с. 3.
2. Бартон Д., Вард Г. Справочник по радиолокационным измерениям/Пер. с англ. – М.: Сов. Радио, 1976.
3. Патент РФ 2346291 С2 МПК G01S 13/04 (2006.01). Многодиапазонный радиолокационный комплекс / А.Д. Бомштейн, Б.И. Поляков [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГУП «ННИИРТ». – № 2007112178; заявл. 02.04.2007; опубл. 10.02.2009, Бюл. №4.
4. Патент РФ № 96117136 МПК G01S13/02. Устройство распознавания воздушных целей двухчастотным способом / Л.А. Бондарев, П.А. Жигунов, Д.Г. Митрофанов; заявитель и патентообладатель Военная академия противовоздушной обороны сухопутных войск РФ. – № 96117136/09; заявл. 26.08.1996; опубл. 27.06.1998.

5. Юдин В. А., Панов Д. В., Караваев С. А., Мурашкин А. В. Оценка радиальных размеров воздушных целей с использованием двух- и многочастотных зондирующих сигналов. Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А. С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и её применение. Выпуск X-1. Москва. «Инсвязьиздат», 2008. С. 348–351.

*Статья поступила в редакцию 17.03.2015*

**Бомштейн Александр Давидович**

к.т.н., главный конструктор по направлению ОАО «ФНПЦ «ННИИРТ» (603139, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 83), тел. 8(831) 465-17-34, e-mail: bad55@mail.ru

**Жигунов Павел Александрович**

к.т.н., старший научный сотрудник научно-исследовательского центра «Военной академии войсковой противовоздушной обороны ВС РФ» (214030, Смоленск, Краснинское шоссе, 5, тел. 8(910)7100073, e-mail: PavZhigunov@yandex.ru

**Advanced technologies for measurement of target longitudinal size in a multiband integrated radar system**

**Alexander D. Bomshteyn, Pavel A. Zhigunov**

This paper deals with application of emerging radar technologies of radars adaptive interaction operating at different frequency bands for the measurement of the longitudinal size of a target. A two-stage measurement method is proposed allowing the task to be completed in a considerably reduced time.

*Keywords:* integrated radar system, longitudinal size of a target, multifrequency signal.