

ФОРМИРОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В НЕКОГЕРЕНТНЫХ МНОГОПОЗИЦИОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Б. Г. Татарский, Д. А. Ясенцев, А. А. Сурков

В статье приведены результаты математического моделирования алгоритма формирования радиолокационного изображения участка подстилающей поверхности в пространственно-распределённой некогерентной многопозиционной радиолокационной системе. Формирование радиолокационного изображения основывается на пространственно-спектральном алгоритме, суть которого заключается во взвешенном геометрическом суммировании линий положения, соответствующих каждому отсчёту формируемого изображения. Линии положения в рассматриваемом случае являются полуокружностями, поскольку предполагается, что каждая из приёмопередающих позиций формирует дальностный срез зондируемого участка подстилающей поверхности. В ходе моделирования были получены радиолокационные изображения, исследовано влияние числа позиций на качество формируемого изображения, а также оценена разрешающая способность многопозиционной радиолокационной системы.

Ключевые слова: формирование радиолокационных изображений, пространственно-спектральный алгоритм, некогерентное накопление.

Введение

Переход к пространственно-распределённым радиолокационным системам (РЛС) – одна из главных тенденций развития РЛС, оформившаяся в последние несколько десятилетий. В рамках данного направления выделились отдельные разновидности систем, такие как многопозиционные и распределённые РЛС с подвижными и неподвижными позициями, а также РЛС, построенные по принципам множественного входа, множественного выхода (Multi input, multi output – МИМО) [1]. К преимуществам данного подхода к построению РЛС наблюдения объектов относятся возможность формирования зоны обзора заданного вида за счёт размещения элементов системы в необходимых точках пространства, повышение энергопотенциала системы, разрешающей способности и точности определения координат и параметров движения наблюдаемых объектов за счёт увеличения объёма обрабатываемого отражённого сигнала, что обуславливается увеличением числа приёмных антенн, входящих в состав системы. Прежде всего, существенный энергетический выигрыш даёт кооперативный прием сигналов, при котором энергия излучения каждой передающей позиции используется всеми приёмными позициями [1 – 3]. В многопозиционных (МП) РЛС появляется возможность определения трех координат цели путем измерения дальности относительно нескольких разнесенных РЛС или суммарной дальности (передающая позиция – цель – приемная позиция) относительно нескольких разнесенных позиций [4, 5]. Кроме того, появляется возможность оценки вектора скорости и вектора ускорения наблюдаемых движущихся целей, что крайне важно при решении задач их сопровождения и прицеливания по обнаруженным объектам. В то же время, вопросам формирования радиолокационных изображений (РЛИ) МП РЛС посвящено не так много работ. Как правило, основное внимание обращено

на формирование РЛИ когерентными РЛС [2]. Однако в ряде случаев представляет интерес формирование РЛИ некогерентными МП РЛС. Формирование РЛИ подстилающей поверхности в некогерентных МП РЛС по своей структуре похоже на решение задачи формирования РЛИ в радиолокаторах подповерхностного зондирования [3]. Исходя из этого, целесообразным является рассмотрение принципов и алгоритмов, применяемых при формировании РЛИ в радиолокаторах подповерхностного зондирования.

Для решения задач формирования РЛИ в радарх подповерхностного зондирования выделяют несколько различных подходов [6, 7], основными из которых являются пространственно-спектральный алгоритм и алгоритм обратного проецирования во временной области.

Алгоритм обратного проецирования во временной области является заметно более сложным для реализации. Для реализации данного алгоритма используется двумерное преобразование Фурье, в котором применяется ключевая (фильтрующая) функция алгоритма миграции, которая может быть вычислена двояко. Для восстановления изображения производится операция интерполяции Столта, и на последнем шаге выполняется обратное трехмерное преобразование Фурье. Сложность этого алгоритма компенсируется его более эффективным результатом для практической реализации [6].

Пространственно-спектральный алгоритм при голографической интерпретации по своей сути представляет собой решение геометрической задачи прохождения электромагнитной волны в среде распространения. Если пренебречь искажениями сигналов в среде, то для конкретной координаты все колебания, отражённые от объекта, сложатся синфазно. В других точках поверхности сигналы при обработке складываются с различными задержками и амплитуда результирующего колебания быстро

убывает. После выполнения всех необходимых преобразований на выходе получают семейство полуокружностей, пересечение которых после суммирования даёт представление о положении цели.

Рассмотрим данный алгоритм подробнее. Пусть P – отображаемые координаты точек радиосцены; t_n – момент излучения сигнала, возбуждающего антенну, находящуюся в точке на расстоянии R_n от n -й точки формируемой радиосцены.

Пространственно-спектральный алгоритм реализуется следующим образом:

$$U(P, t) = \sum_{n=1}^N s_n(t) h_0(t - t_n - 2|P - R_n|/c). \quad (1)$$

Одним из вариантов алгоритма (1) является алгоритм гиперболического суммирования. В этом случае для формирования изображения объекта его радиообраз представляется в виде совокупности радиообразов точечных объектов. Тогда алгоритм формирования отражённого сигнала s_n для точек регистрации, расположенных на поверхности среды $R_n = X_k \mathbf{x} + Y_k \mathbf{y}$; $Z_k = 0$, учитывающий M и N результатов зондирования по сетке ортогональных продольных координат можно записать выражением:

$$U_n(t_n, X_k, Y_k) = \sum_{m=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} W_{mn} s(t_{mn}, X_k + m\Delta X, Y_k + n\Delta Y), \quad (2)$$

где M, N – число суммируемых отсчётов по осям X и Y ; $\Delta X, \Delta Y$ – шаг по осям X и Y ; W_{mn} – весовая функция; t_{mn} – задержка сигнала от исследуемого объекта до точки наблюдения на поверхности.

Выражения для прямоугольной и треугольной весовых функций имеют вид:

$$W_{mn} = \frac{1}{MN}, \quad W_{mn} = \frac{4(M+1-2m)(N+1-2n)}{(M+1)^2(N+1)^2}. \quad (3)$$

Время запаздывания t_{mn} определяется как

$$t_{mn} = \frac{2}{c} \sqrt{(m\Delta X)^2 + (n\Delta Y)^2 + \left(\frac{ct_k}{2}\right)^2}, \quad (4)$$

где t_k – время распространения сигнала до объекта зондирования и обратно для начального этапа зондирования.

Сигналы, отражённые от точечного объекта и регистрируемые РЛС, размещёнными в различ-

ных точках пространства, наблюдаются с задержкой, определяемой расстоянием до объекта.

Схожие алгоритмы также находят своё применение для решения томографических задач. В этом случае используемые преобразования алгоритма позволяют улучшить эффективность в сравнении с радиолокационной задачей. Недостатком этого алгоритма при его использовании в подповерхностных РЛС является неудовлетворительные показатели проникающей способности радиоволны [6, 7], что не является недостатком в случае формирования радиолокационных изображений в некогерентных МП РЛС, работающих в свободном пространстве.

Идея компенсации изменения времени запаздывания при использовании некогерентного суммирования заключается в объединении энергии отражения от соседних сканов для получения эффекта фокусировки. Этот процесс также называют цифровым «формированием луча», поскольку фокусируется энергия антенны путём постобработки цифрового представления выходного сигнала РЛС подповерхностного зондирования. Принцип этого метода обработки проиллюстрирован на рис. 1.

Формируются 3 скана из положений антенны $A1, A2$ и $A3$. В каждом из этих сканов мы получаем отражение от заглубленного объекта. По временной задержке отражений мы можем вычислить расстояние объекта от каждого положения антенны. Это единственное ограничение, которое мы можем получить при индивидуальном сканировании. Объект может находиться в любом месте в пределах ширины луча или поля зрения антенны, если он удовлетворяет ограничению по расстоянию.

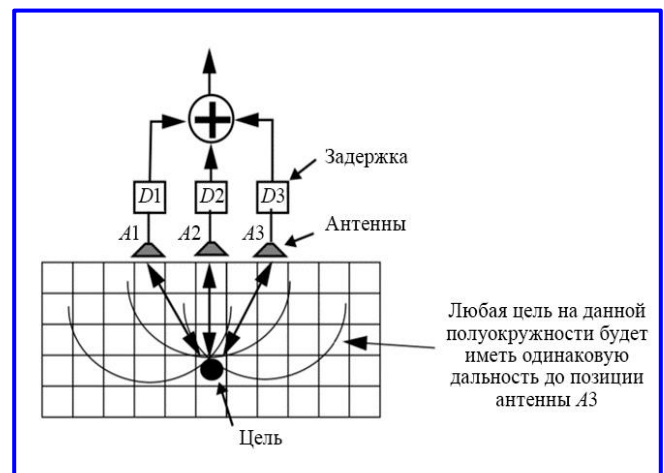


Рис. 1. Фокусировка луча подповерхностного радиолокатора с помощью некогерентного суммирования: $D1 - D3$ – модули задержки; $A1 - A3$ – антенны

Идея алгоритма некогерентного суммирования заключается в том, что, принимая во внимание расстояния объекта до нескольких антенн, мы можем точно определить местоположение объекта в поле зрения антенны. Математически эту операцию можно представить как пересечение трех кривых, показанных на рис. 1. Каждая кривая представляет собой возможный объект.

При использовании алгоритма некогерентного суммирования производится некогерентное суммирование сигналов, поступающих от каждой из антенн. Математически эту операцию можно представить как пересечение трех линий равных дальностей (ЛРД) (полуколец), соответствующих трём различным положениям антенны относительно объекта (рис. 1). Каждая кривая соответствует возможному положению объекта на заданной дальности от антенны.

В алгоритме некогерентного суммирования входной сигнал в каждом положении антенны некогерентно суммируется с сигналами, полученными из соседних положений. При суммировании сигналов, полученных из разных положений антенны, учитываются времена запаздывания сигналов. Другой способ представления процесса суммирования показан на рис. 2, который реализуется распределённой антенной системой (антенной решёткой), элементы которой отстоят друг от друга на одинаковом расстоянии вдоль заданного направления. На рис. 2 объединение принимаемых сигналов для точного определения местоположения объекта осуществляется с пяти различных позиций.

Постановка задачи

Рассмотрим возможности по использованию алгоритмов некогерентного суммирования отсчётов дальностных срезов (ДС) при формировании РЛИ в некогерентной МП РЛС. Будем считать, что МП РЛС состоит из N стационарных однопозиционных (ОП) РЛС и центрального пункта обработки (ЦПО) (рис. 3). Каждая из ОП РЛС формирует свой ДС зондируемого участка подстилающей поверхности, располагаемого от позиций отдельных РЛС соответственно на расстоянии R_n , $n = \overline{1, N}$. Координаты точек расположения ОП РЛС считаются априори известными. Необходимо, опираясь на выходные сигналы ДС каждой ОП РЛС, получить РЛИ наблюдаемого участка, включающего в себя совокупность неподвижных точечных отражателей с эффективной площадью отражения (ЭПО), существенно превосходящей ЭПО окружающего фона.

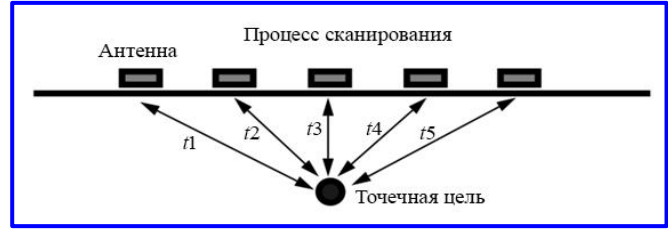


Рис. 2. Линейный скан над маленьким объектом

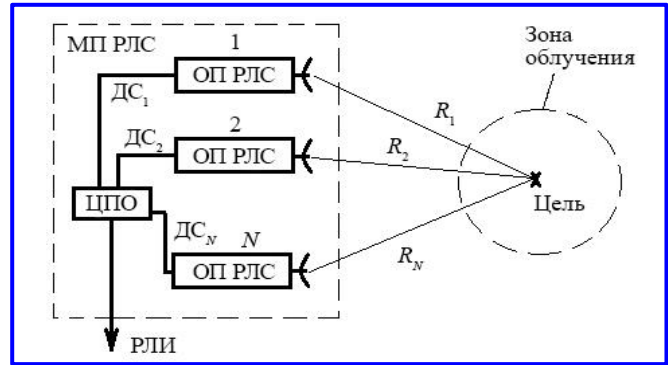


Рис. 3. Графическая иллюстрация постановки задачи

Для решения данной задачи рассмотрим входной сигнал $S_{\text{ВХ}_n}(t)$, поступающий на n -ю ОП РЛС. В данной ситуации его можно записать в виде:

$$S_{\text{ВХ}_n}(t) = A_n S_{\text{изл}}(t - \tau_{R_n}) = A_n S_{\text{изл}}\left(t - \frac{2R_n}{c}\right) \exp(j\varphi_{0_n}), \quad (5)$$

где A_n – случайная амплитуда отражённого сигнала; $S_{\text{изл}}(t)$ – излучённый зондирующий сигнал; τ_{R_n} – время запаздывания отражённого сигнала относительно излучённого; R_n – расстояние от цели до n -й ОП РЛС; φ_{0_n} – случайная начальная фаза отражённого сигнала n -й ОП РЛС.

Принятый каждой n -й ОП РЛС сигнал усиливается, переносится на промежуточную частоту, оцифровывается, после чего подвергается процедуре свёртки с опорной функцией $h_{\text{ОП}_n}(t, m)$, где m – номер отчёта формируемого ДС. Опорная функция представляет собой комплексно-сопряжённую величину относительно излучаемого сигнала:

$$\dot{h}_{\text{ОП}_n}(t, m) = S_{\text{изл}_n}^*(t - m\delta\tau),$$

где $\delta\tau$ – разрешающая способность ОП РЛС по времени запаздывания, определяемая шириной спектра зондирующего сигнала. Амплитуды отсчётов ДС определяются выражением:

$$J_n(m) = \left| \int_0^T S_{\text{ВХ}_n}(t) \dot{h}_{\text{ОП}_n}(t, m) dt \right|. \quad (6)$$

В соответствии с постановкой задачи необходимо получить РЛИ объекта (объектов) на участке наблюдаемой поверхности согласно с алгоритмом:

$$I(X_k, Y_k) = \sum_{n=1}^N J_n(m(X_k, Y_k)). \quad (7)$$

Для определённости будем считать, что МП РЛС состоит из трёх ОП РЛС (*), а объект наблюдения (x) располагается на удалении от позиций РЛС, как это показано на рис. 4.

Приведённые далее в работе числовые значения величин не привязаны к каким-либо конкретным образцам РЛС и служат для иллюстрации возможности реализации приведённых выше алгоритмов.

Формирование дальностных срезов

Для реализации поставленной задачи необходимо в каждой позиции сформировать ДС зондируемого участка подстилающей поверхности, а провести их

некогерентное накопление, в соответствии с (7). В качестве модели зондирующего сигнала будем использовать линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ) импульс с девиацией частоты 50 МГц, обеспечивающий разрешение по дальности около 3-х метров.

При наличии в зоне наблюдения одиночной цели ДС, сформированный в соответствии с алгоритмом (6), будет иметь вид, представленный на рис. 5. При наличии трёх точечных целей в зоне наблюдения ДС будет иметь вид, приведённый на рис. 6.

Как видно из представленных ДС, они являются адекватным отображением моделируемой тактической ситуации.

Накопление дальностных срезов

Дальнейшая обработка ДС, необходимая для формирования РЛИ, заключается в накоплении срезов, полученных пространственно-разнесённых ОП РЛС. Графически данную операцию можно представить на рис. 7.

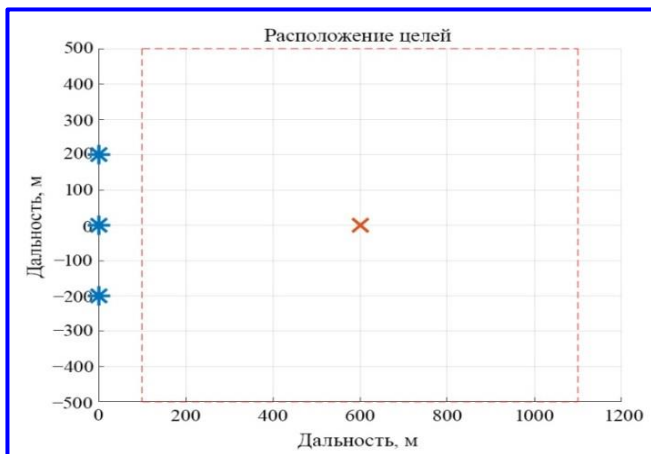


Рис. 4. Геометрия расположения радиолокационных датчиков и зоны наблюдения

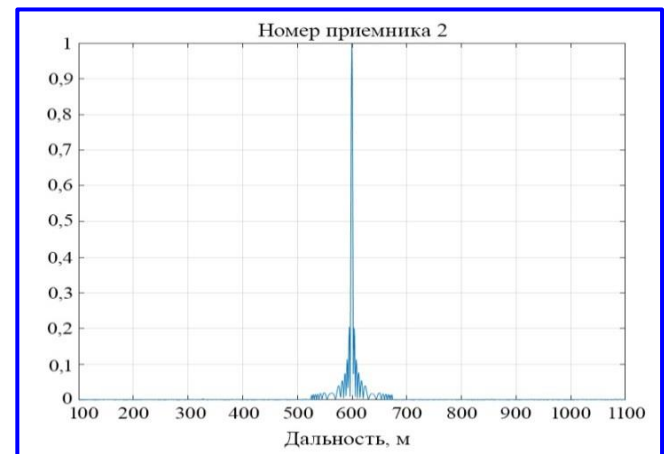


Рис. 5. Дальностный срез сцены с точечным отражателем, показанным на рис. 4

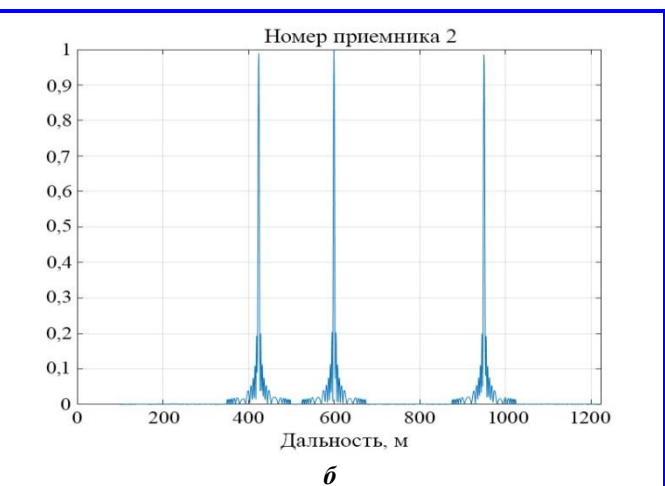
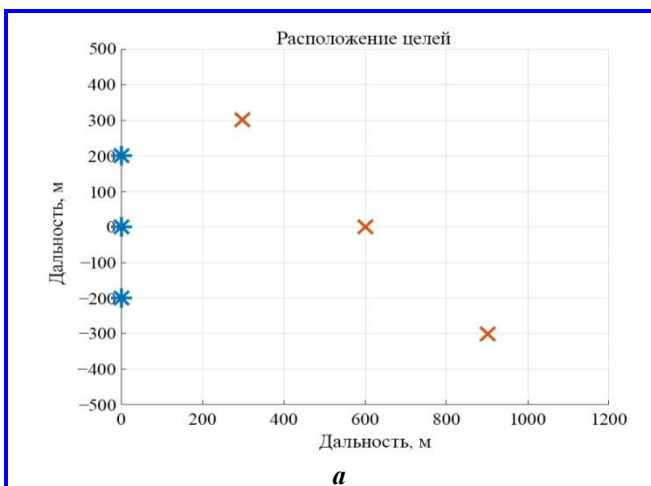


Рис. 6. Дальностные срезы, сформированные одной радиолокационной системой при расположении трёх точечных целей: а – геометрия наблюдения точечных отражателей; б – дальностный срез сцены с точечными отражателями

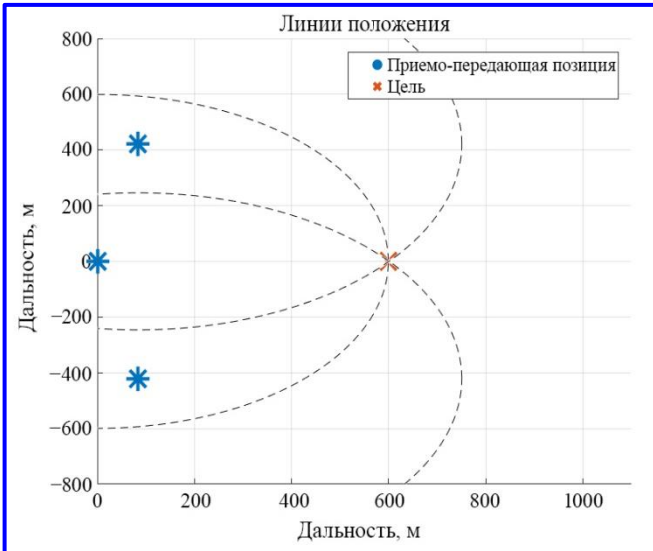


Рис. 7. Геометрия решения задачи пространственно-спектральным способом

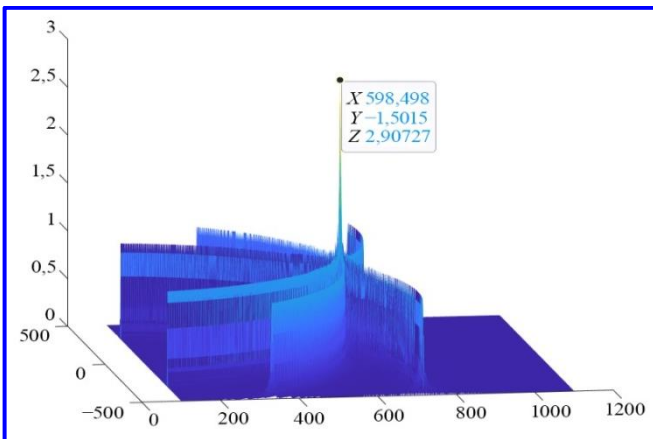


Рис. 8. Результат формирования радиолокационного изображения сцены с точечным отражателем при накоплении трёх дальностных срезов для сцены, показанной на рис. 4

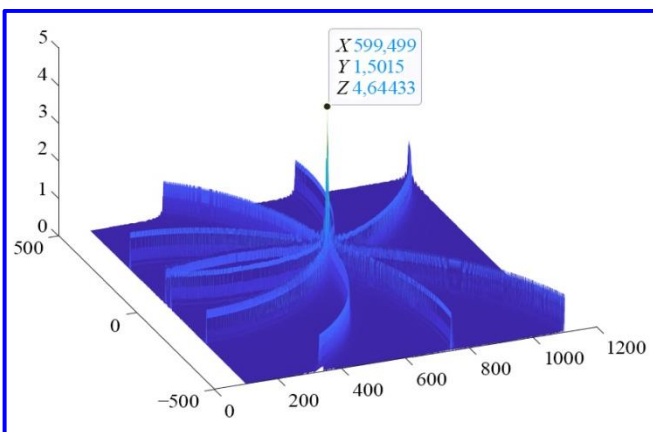


Рис. 9. Результат формирования радиолокационного изображения сцены с точечным отражателем при накоплении пяти дальностных срезов для сцены, показанной на рис. 4

Как указывалось выше, для накопления ДС необходимо сложить амплитуды отсчётов ДС, соответствующих времени запаздывания огибающей отражённого сигнала до каждой точки формируемого РЛИ. Предполагая, что сетка РЛИ является регулярной и равномерной, при моделировании рассчитывались координаты опорных точек сетки изображения. Шаг сетки отсчётов РЛИ выбирается равным 3 метрам, что соответствует разрешающей способности моностатической РЛС по дальности. Уменьшение сетки отсчётов нецелесообразно вследствие невозможности разрешения целей в соседних элементах изображения. Затем были рассчитаны величины времени запаздывания огибающей сигналов для каждой из точек сетки РЛИ и всех ОП РЛС согласно (4). Рассчитанные значения округлялись до целых значений элементов разрешения по времени запаздывания. После этого амплитуды отсчётов ДС, соответствующие округлённым значениям времён запаздывания, суммируются между собой для каждой точки выбранной сетки формируемого РЛИ. В результате полученное для данной модельной задачи РЛИ приведено на рис. 8. Анализ сформированного отклика на точечную цель позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, за счёт некогерентного накопления нескольких ДС в МП РЛС обеспечивается разрешение целей по азимуту. Во-вторых, имеется достаточно высокий уровень боковых лепестков отклика, который можно оценить как $1/K$, где K – число суммируемых ДС.

Увеличение числа накапливаемых ДС позволяет уменьшить уровень боковых лепестков отклика, как это показано на рис. 9, на котором приведён отклик системы из пяти ОП РЛС с базой между крайними системами 800 метров.

Рассмотрим возможности МП РЛС с некогерентным объединением ДС по обеспечению разрешения поперёк линии визирования. Для этого был проведён модельный эксперимент, в котором имитировались два точечных отражателя, расположенные со смещением друг относительно друга по поперечной дальности на расстоянии 3 метра. В результате обработки сформированного от двухточечной цели сигнала получили отклик, изображённый на рис. 10. Изображение на рис. 10, а, соответствует сечению отклика по шкале азимута, а 10, б – трёхмерному отклику.

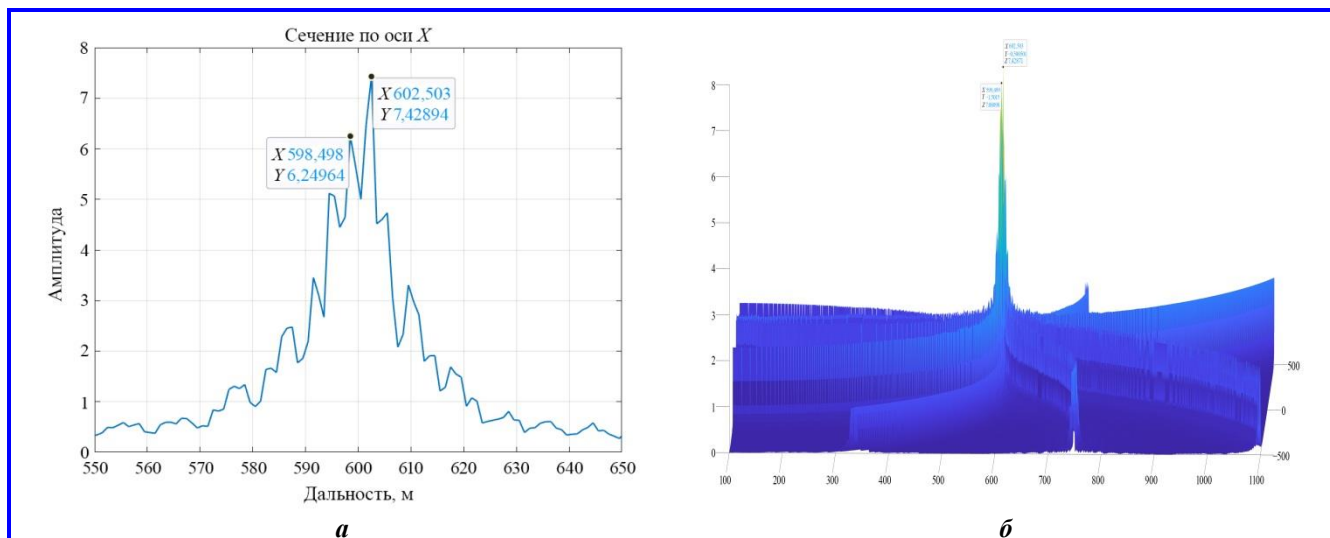


Рис. 10. Оценка азимутального разрешения многопозиционных радиолокационных систем при накоплении пяти дальностных срезов: а – сечение изображения по азимуту; б – результат формирования изображения сцены в трёхмерном виде

Как видно из рис. 9, при выбранной конфигурации приёмопередающих позиций обеспечивается разрешение целей при расстоянии между ними по азимуту 3 метра. Ошибки оценивания положения отметок целей обусловлены дискретностью отсчётов дальности при формировании ДС и дискретностью формируемых РЛИ.

В [8] приведена оценка потенциального линейного азимутального разрешения при формировании РЛИ за счёт некогерентного накопления отражённых широкополосных зондирующих сигналов на примере видеоимпульсной РЛС космического базирования. Для прямолинейной апертуры разрешение РЛС с синтезированием апертуры (РСА) по азимуту ρ_x определяется как

$$\rho_x = \frac{R_0 \rho_r}{2\sqrt{2}L_a}, \quad (8)$$

где R_0 – наклонная дальность до объекта зондирования; ρ_r – разрешение РЛС по дальности; L_a – линейный размер участка накопления отражённого сигнала. Для рассматриваемого случая теоретическая оценка разрешения по выражению (8) составит около 1 метра.

Выводы

Материалы, изложенные в статье, позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Существует совокупность методов, позволяющих обеспечить формирование РЛИ наземных объектов за счёт некогерентного накопления ДС в пространственно-распределённых МП некогерент-

ных РЛС (алгоритм обратного проецирования, пространственно-спектральный алгоритм, томографические алгоритмы).

2. Увеличение количества приёмопередающих позиций в МП некогерентной РЛС позволяет получать РЛИ зондируемой сцены с малым уровнем боковых лепестков, который при пространственно-спектральном алгоритме обратно пропорционален числу позиций.

3. За счёт накопления ДС обеспечивается разрешение по поперечной дальности (азимуту) около 3-х метров, что соизмеримо с разрешением по радиальной дальности. Это даст возможность формировать равномасштабное РЛИ зондируемой сцены.

Литература

1. Черняк В. С. Многопозиционная радиолокация / В. С. Черняк. – Москва: Радио и связь, 1993. – 416 с.
2. Кондратенков Г. С. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Г. С. Кондратенков, А. Ю. Фролов; под ред. Г. С. Кондратенкова. – Москва : Радиотехника, 2005. – 368 с.
3. Зайцев Д. В. Многопозиционные радиолокационные системы: методы и алгоритмы обработки информации в условиях помех / Д. В. Зайцев. – Москва : Радиотехника, 2007. – 112 [8] с.
4. Радиолокационные системы: учебник / В. П. Бердышев, Е. Н. Гарин, А. Н. Фомин [и др.]; под общ. ред. В. П. Бердышева. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2011. – 400 с.
5. Кондратьев В. С. Многопозиционные радиотехнические системы / В. С. Кондратьев, А. Ф. Котов, Л. Н. Марков; под ред. проф. В. В. Цветнова. – Москва : Радио и связь, 1986. – 264 с.

6. Вопросы подповерхностной радиолокации: коллективная монография / А. В. Андриянов [и др.]; под ред. А. Ю. Гринёва. – Москва : Радиотехника, 2005. – 413 с.
7. Herman H. Robotic Subsurface Mapping Using Ground Penetrating Radar: Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Robotics / Herman Herman; The Robotics Institute, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, May 1997. – 143 p. – URL : https://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub1/herman_herman_1997_1/herman_herman_1997_1.pdf.
8. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Верба, Л. Б. Неронский, И. Г. Осипов, [и др.]; под ред. В. С. Вербы. – Москва : Радиотехника, 2010. – 675 с.

Поступила в редакцию 21.02.2024

Борис Григорьевич Татарский, доктор технических наук, профессор, директор научно-образовательного центра АО «Концерн радиостроения «Вега», профессор кафедры 410 МАИ, т. +7 (926) 420-57-28, e-mail: boris-tatarsky@inbox.ru.
Дмитрий Александрович Ясенцев, доктор технических наук, профессор кафедры 410 МАИ, т. +7 (926) 623-53-57, e-mail: yasentsev@yandex.ru.
Александр Алексеевич Сурков, магистрант, т. +7 (916) 680-91-91, e-mail: armorcoon@gmail.com.
 (Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)).

FORMATION OF RADAR IMAGES IN INCOHERENT MULTI-POSITION RADAR SYSTEMS

B. G. Tatarsky, D. A. Yasentsev, A. A. Surkov

In this paper presented the results of mathematical modeling of the algorithm of radar imaging of the underlying surface area in specially distributed incoherent multi-position radar system. Radar image formation is based on the spatial-spectral algorithm, the essence of which is the weighted summation of position lines corresponding to each count of the formed image. The position lines in the considered case are half-circles, since it is assumed that each of the receiving positions forms a range slice of the probed area of the underlying surface. In the course of modeling, radar images were obtained, the influence of the number of positions on the quality of the formed image was investigated, and the resolving power of the multi-position radar was estimated.

Key words: radar imaging, spatial-spectral algorithm, incoherent accumulation.

References

1. Chernyak V. S. Multi-position radar / V. S. Chernyak. – Moscow: Radio and Communications, 1993. – 416 p.
2. Kondratenkov G. S. Radiovision. Radar systems for remote sensing of the Earth. Study guide for universities / G. S. Kondratenkov, A. Yu. Frolov; ed. by Kondratenkov G. S. – Moscow : Radiotekhnika, 2005. – 368 p.
3. Zaitsev D. V. Multi-position radar systems: methods and algorithms of information processing in interference conditions / D. V. Zaitsev. – Moscow : Radiotekhnika, 2007. – 112 [8] p.
4. Radar systems: textbook / V. P. Berdyshev, E. N. Garin, A. N. Fomin [et al.]; ed. by V. P. Berdyshev. P. Berdyshev. – Krasnoyarsk : Siberian Federal University, 2011. – 400 p.
5. Kondratyev V. S. Multi-position radio engineering systems / V. S. Kondratyev, A. F. Kotov, L. N. Markov; edited by Prof. V. V. Tsvetnov. – Moscow : Radio and Communication, 1986. – 264 p.
6. Questions of subsurface radarization: a collective monograph / A. V. Andriyanov [et al.]; ed. by A. Yu. Grinev. – Moscow : Radiotekhnika, 2005. – 413 p.
7. Herman H. Robotic Subsurface Mapping Using Ground Penetrating Radar: Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Robotics / Herman Herman; The Robotics Institute, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, May 1997. – 143 p. – URL https://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub1/herman_herman_1997_1/herman_herman_1997_1.pdf.
8. Space-based radar systems of ground surveillance / V. S. Verba, L. B. Neronsky, I. G. Osipov [at al.]; ed. by V. S. Verba. – Moscow : Radio-technica, 2010. – 675 p.

Boris Grigoryevich Tatarsky, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Scientific and Educational Center of JSC «Concern radiostroenia «Vega», Professor of the department 410 MAI, e-mail: boris-tatarsky@inbox.ru, t. +7 (926) 420-57-28.

Dmitry Aleksandrovich Yasentsev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the department 410, t. +7 (926) 623-53-57, e-mail: yasentsev@yandex.ru.

Alexander Alekseevich Surkov, Master's student, t. +7 (916) 680-91-91, e-mail: armorcoon@gmail.com.
 (Moscow Aviation Institute (National Research University)).