

## РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И РАДИОИЗОБРАЖЕНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ОБЪЕКТОВ В НАЗЕМНЫХ ММО-РАДИОКАМЕРАХ

**В.В. Чапурский**

valch2008@yandex.ru

**Г.П. Слукин**

niiret@bmstu.ru

**М.И. Нониашвили**

min-st-1986@mail.ru

**Г.А. Лесников**

gless@bk.ru

**МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация**

---

### Аннотация

Для двух вариантов наземной ММО-радиокамеры выполнен анализ разрешающей способности на основе двумерных сечений обобщенной функции неопределенности по пространственным координатам. В качестве ортогональных по времени зондирующих сигналов передающих элементов радиокамер использованы широкополосные сигналы со ступенчатой частотной модуляцией. На математической модели системы пространственно-временной обработки сигналов приемных элементов ММО-радиокамеры рассмотрены примеры построения 2D- и 3D-радиоизображений многоточечных протяженных стационарных объектов при расположении их на различной высоте над земной поверхностью

### Ключевые слова

*Мультистатическая радиологرافия, ММО-радиокамера, радиоизображение, эффективная поверхность рассеяния, ступенчатая частотная модуляция, обобщенный корреляционный интеграл обработки, пространственно-временная обработка*

Поступила 17.12.2018

© Автор(ы), 2019

---

**Введение.** Одной из практически важных задач при измерениях эффективных поверхностей рассеяния (ЭПР) сложных стационарных объектов является задача измерения ЭПР отдельных частей или фрагментов исследуемого объекта. Такие радиоизмерения могут потребоваться в различных диапазонах частот для разных объектов — автомобилей, объектов бронетехники, самолетов, а также строительных сооружений, в том числе средств радиомаскировки и «ложных» объектов. Важным требованием к измерительному комплексу может быть простота конструкции, мобильность и малое время развертывания.

Впервые задача определения ЭПР частей движущихся воздушных объектов (ВО) была решена и получила экспериментальное подтверждение в работах [1–4]. В качестве теоретической основы этих работ использовались предложенный в работе [3, 4] метод радиокамеры (РК) и метод

инверсного радиолокационного синтезирования апертуры (ИРСА). Согласно работам [2, 3], метод РК предполагает применение передающей антенны и приемной антенной решетки (АР) из некоторого числа в общем случае произвольно расположенных приемных антенных элементов. При случайном расположении антенных элементов фазы сигналов на выходах приемных каналов АР могут быть скорректированы за счет эталонного отражателя или внешнего источника, что позволяет осуществить когерентную обработку вектора всех принимаемых сигналов. При этом разрешение по дальности и угловым координатам традиционно определяется шириной полосы зондирующего сигнала (ЗС) и размерами апертуры приемной АР, которая может быть существенно разреженной.

В случае недостаточного углового разрешения и при использовании разреженной приемной АР может дополнительно использоваться метод ИРСА [4], позволяющий синтезировать большую апертуру за счет движения реального ВО, например самолета. При таком подходе подавляются дифракционные лепестки АР, достигается высокое разрешение по азимутальной координате и при высоком разрешении по дальности осуществляется весьма детальное построение двумерного радиолокационного изображения (РИ) летящего ВО, что важно для распознавания. С использованием данного подхода также можно реализовать измерение ЭПР отдельных частей ВО [1, 4]. Однако такой метод сопряжен с серьезным недостатком, так как дает возможность получать только двумерные РИ. Этот метод связан с большим числом практических трудностей, начиная от необходимости осуществления реальных полетов ВО и наблюдения его под разными ракурсами и кончая наличием траекторных нестабильностей [5] и невысокой детальностью двумерного РИ самолета.

По указанным причинам задача измерения ЭПР отдельных частей разных видов *двумерных* (2D) и *трехмерных* (3D) объектов, стационарно расположенных, например, на технологической площадке или на некоторой местности, выделяется в отдельный вид измерений и требует применения и анализа иных научно-технических решений. Одним из таких решений может быть метод синтезирования апертуры с помощью движущегося радиолокатора по прямой или круговой траектории вблизи исследуемого объекта. Здесь также могут возникать технологические трудности, связанные, например с решением задачи движения радиолокатора с синтезированием апертуры антенны (РСА) по специально организованному рельсовому пути или тросу с контролируемой скоростью с учетом траекторной нестабильности такого движения. Другим решением может быть применение наземной РК [3] в виде многопозиционной

радиолокационной системы (РЛС), состоящей из некоторого числа приемных и передающих элементов. Для улучшения разрешающей способности и уменьшения числа передающих и приемных элементов АР такой РК целесообразно использование принципов ММО-радиолокации, изложенных, например, в работе [6]. Передающие элементы ММО РЛС, являющиеся слабонаправленными и неуправляемыми по фазам, излучают широкополосные (ШП) или сверхширокополосные (СШП) зондирующие сигналы, ортогональные от одного передающего элемента антенной системы (АС) к другому [6]. Приемные элементы АС принимают сигналы всех передающих элементов, отраженных от цели. Элементы АС наземной ММО РК могут располагаться в плоскости земной поверхности в ближней зоне наблюдения зондируемого объекта. Важным обстоятельством при расположении элементов АС ММО РК непосредственно в плоскости земной поверхности является отсутствие помех типа «антиподов» вследствие интерференционных переотражений от поверхности [7] на трассах распространения «передающий элемент–точка объекта–приемный элемент».

*Цель работы* — изложение предварительных теоретических результатов по сравнительной оценке пространственной разрешающей способности на основе обобщенной функции неопределенности (ОФН) для двух простых вариантов наземных ММО РК, а также анализ примеров получения 2D и 3D РИ многоточечных стационарных объектов в данных вариантах ММО РК.

**Обобщенная функция неопределенности и разрешающая способность ММО-радиокамеры.** Вычисление ОФН по пространственным координатам для ММО РК аналогично случаю ММО РЛС [6]. Вычисление осуществляется по выражению для обобщенного корреляционного интеграла (ОКИ) принимаемого векторного сигнала точечной цели в точке пространства с вектором координат  $\vec{r}_0 = \|x_0, y_0, z_0\|^T$  с ожидаемым или опорным вектором сигналов, отвечающих расположению одиночной цели в опорной точке пространства, характеризуемой вектором  $\vec{r} = \|x, y, z\|^T$ .

Полагаем, что АС наземной ММО РК состоит из передающих и приемных элементов, лежащих в плоскости  $xOy$  прямоугольной системы координат  $(x, y, z)$ . Тогда положения  $n$ -го передающего и  $k$ -го приемного элементов определяются векторами  $\vec{r}_{tn} = \|x_{tn}, y_{tn}, 0\|^T$ ,  $n = 0, \dots, N_t$  и  $\vec{r}_{rk} = \|x_{rk}, y_{rk}, 0\|^T$ ,  $k = 0, \dots, N_r$ , где  $N_t + 1$ ,  $N_r + 1$  — число передающих и приемных элементов. Передающие элементы работают последовательно во

времени, излучая в неперекрывающихся (ортогональных) временных интервалах пачки ЗС со ступенчатой частотной модуляцией (СЧМ) [6] с периодом излучения  $T$ . Тогда СЧМ-сигнал, изучаемый  $n$ -м передающим элементом, можно записать в виде пачки  $M + 1$  частотных компонент:

$$\dot{s}(t, n) = \sum_{m=0}^M \dot{s}_m(t - nT). \quad (1)$$

В выражении для СЧМ-пачки (1)  $m$ -я частотная компонента пачки СЧМ-сигнала равна

$$\dot{s}_m(t) = A(t - mT_\omega) \exp(j\omega_m(t - mT_\omega)), \quad (2)$$

где  $A(t) = \text{rect}(t / \tau_\omega)$  — прямоугольный импульс длительностью  $\tau_\omega = T_\omega - \tau_{\max}$  на интервале  $0 < t \leq \tau_\omega$ , амплитуду которого, не нарушая общности, полагаем единичной;  $T_\omega$  — период излучения по времени отдельных частотных компонент  $\dot{s}_m(t)$ ;  $\omega_m = \omega_0 + m\Delta\omega$ ,  $m = 0, 1, \dots, M, M + 1$ ,  $\Delta\omega$  — число и шаг по частоте частотных компонент. Как и в работе [6], величина  $\tau_{\max}$  равна максимальной возможной задержке по всем парам « $n$ -й передатчик– $k$ -й приемник» при нахождении отражателей на максимальной дальности  $R_{\max}$ .

Сигнал  $m$ -й частотной компоненты (2), излученный  $n$ -м передающим элементом, отраженный от отражателя с вектором координат  $\vec{r} = \|x, y, z\|^T$  и принятый  $k$ -м приемным элементом, с точностью до константы равен  $\dot{s}_m(t - \tau_{nk}(\vec{r}))$ ,  $\tau_{nk}(\vec{r})$  — задержка распространения сигнала по пути « $n$ -й передающий элемент–отражатель в точке  $\vec{r} = \|x, y, z\|^T$ – $k$ -й приемный элемент», для которой справедливы соотношения

$$\tau_{nk}(\vec{r}) = \tau_{tn}(\vec{r}) + \tau_{rk}(\vec{r}); \quad (3)$$

$$\tau_{tn}(\vec{r}) = |\vec{r} - \vec{r}_{tn}|/c; \quad \tau_{rk}(\vec{r}) = |\vec{r} - \vec{r}_{rk}|/c, \quad (4)$$

где задержки распространения по путям « $n$ -й передатчик–точка  $\vec{r}$ – $k$ -й приемник», « $n$ -й передатчик–точка  $\vec{r}$ » и «точка  $\vec{r}$ – $k$ -й приемник»,  $c$  — скорость распространения электромагнитных волн;  $|\vec{a}|$  — обозначение модуля вектора  $\vec{a}$ .

При сделанных предположениях и обозначениях в работе [6] получено следующее выражение для комплексного ОКИ ММО РЛС с временным разделением изучаемых СЧМ-сигналов:

$$\dot{Q}(\vec{r}, \vec{r}_0) = \sum_{n,k=0}^{N_t, N_r} \exp\{j(\omega_0 + M\Delta\omega/2)\Delta\tau_{nk}(\vec{r}, \vec{r}_0)\} W(\Delta\omega\Delta\tau_{nk}(\vec{r}, \vec{r}_0)). \quad (5)$$

Здесь  $\Delta\tau_{kn}(\vec{r}, \vec{r}_0) = \tau_{kn}(\vec{r}) - \tau_{kn}(\vec{r}_0)$  — разность задержек, вычисляемая по (3) и (4);  $W(x)$  — дискретное преобразование Фурье (ДПФ) по частотам от функции окна,

$$W(x) = \begin{cases} \alpha - (1 - \alpha) \cos(2\pi m / M) & \text{при } m = 0, 1, \dots, M; \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (6)$$

При  $\alpha = 0,5$  имеем окно Ханна, а при  $\alpha = 0,54$  — окно Хемминга, и ДПФ от (6) равно [6]:

$$W(x) = \alpha \frac{\sin((M+1)x/2)}{\sin(x/2)} + \frac{(1-\alpha)}{2} \left[ \frac{\sin((M+1)(x/2 + \pi/M))}{\sin(x/2 + \pi/M)} + \frac{\sin((M+1)(x/2 - \pi/M))}{\sin(x/2 - \pi/M)} \right]. \quad (7)$$

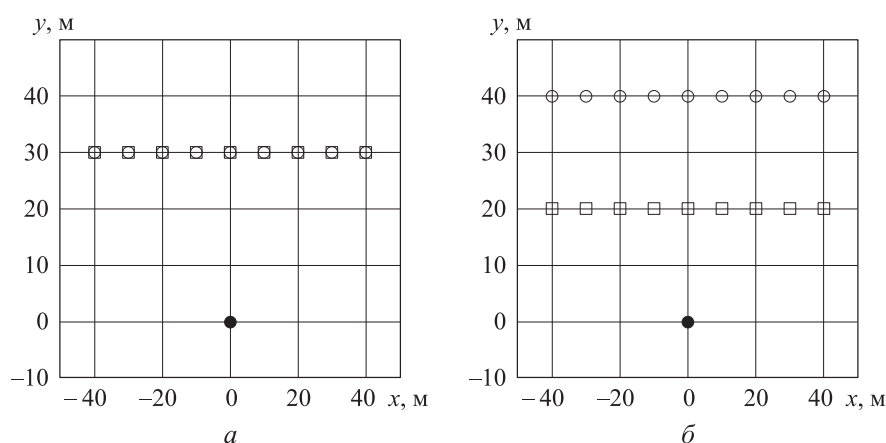
Выражение для ОКИ (5) отвечает полному бистатистическому режиму работы приемных и передающих элементов, когда ЗС (1), излучаемый каждым передатчиком, принимается всеми приемниками. Окончательно в качестве нормированной ОФН ММО РК используют выражение [6]:

$$\Psi(\vec{r}, \vec{r}_0) = |Q(\vec{r}, \vec{r}_0)| / |Q(\vec{r}_0, \vec{r}_0)|. \quad (8)$$

В качестве примеров на основе формул (5) и (8) проведен количественный анализ двумерных сечений ОФН. В сопоставительном плане рассмотрены два варианта расположения элементов АС ММО РК: 1) совмещенные элементы приема-передачи линейной эквидистантной существенно разреженной АР, включающей девять приемо-передающих элементов; 2) разнесенные в земной плоскости по горизонтальной координате параллельные разреженные приемная и передающая АР, каждая состоящая из девяти передающих и девяти приемных элементов при одинаковом шаге между элементами.

Физически разнесение АР в горизонтальной плоскости в варианте 2 ММО РК обеспечивает наличие вертикальной пеленгационной базы, что существенно при наблюдении поднятых над земной поверхностью сосредоточенных отражателей или фрагментов исследуемых 3D-объектов и одновременно гарантирует отсутствие помех типа антипода. Такой прием эквивалентен разнесу АР по высоте, который, в свою очередь, приводит к появлению известных помех типа антипода для отражателей, расположенных на малых высотах. Собственно вариант с разнесом АР по высоте позволяет получить еще один вариант ММО РК. Применительно к задаче восстановления 3D РИ для такого варианта потребуется специфическая теоретическая проработка в дальнейшем с учетом влияния антиподов в ММО РК.

Вид АС ММО РК в проекции на горизонтальную плоскость  $xу0$  представлен вместе с предполагаемым положением точечного объекта на рис. 1, *а* и *б* для вариантов 1 и 2 размещения элементов РК. В случае варианта 1 используется эквидистантная АР из девяти приемо-передающих элементов с шагом 10 м. В варианте 2 применены отдельные передающая и приемная эквидистантные АР из девяти элементов с шагом 10 м каждая, они состоят друг от друга на 20 м.

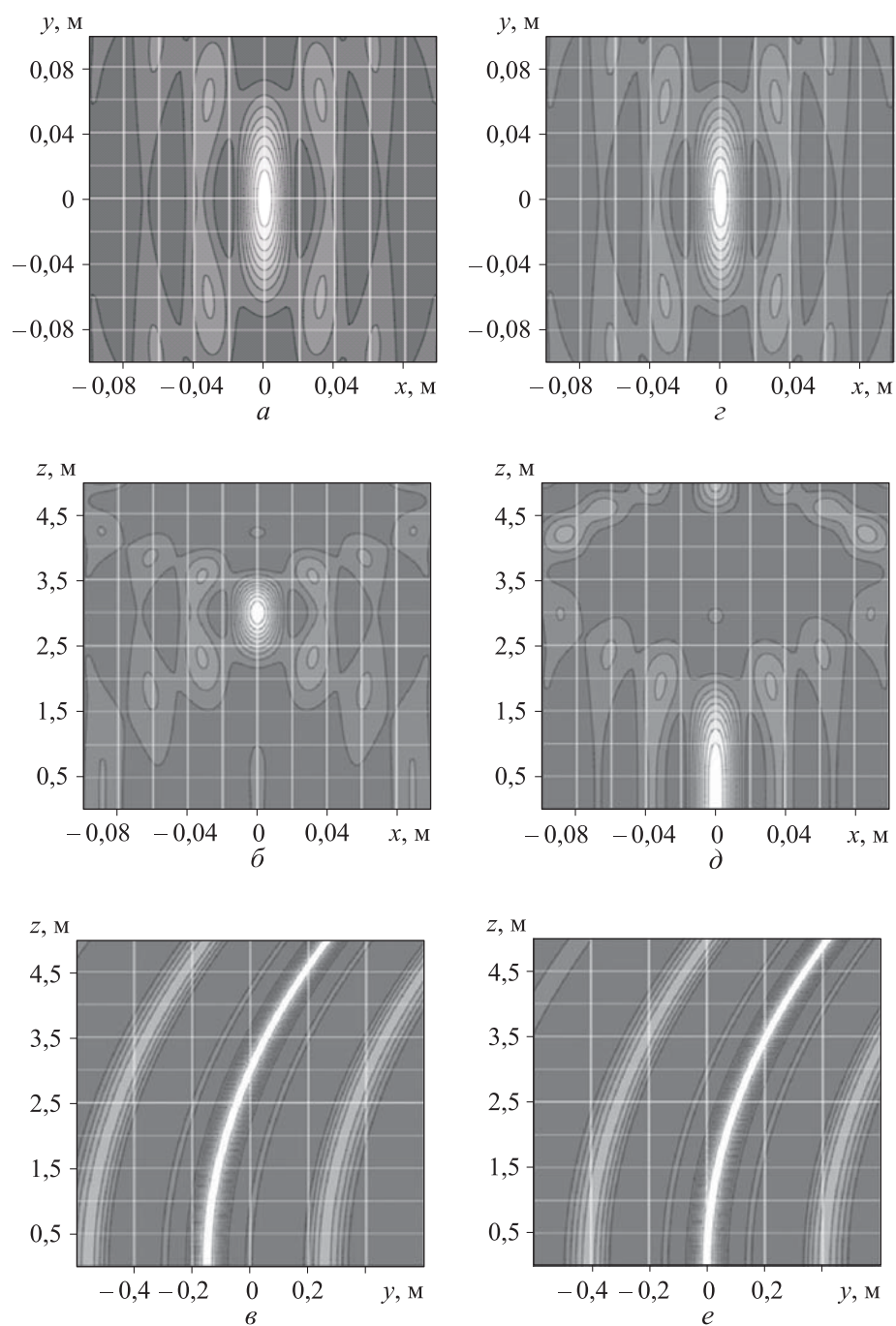


**Рис. 1.** Положение передающих и приемных элементов РК по вариантам 1 (*а*) и 2 (*б*) относительно точечной цели (цель показана черным кружком)

При вычислении сечений ОФН рассматривались два значения высоты точечного объекта над плоскостью  $xу0$ , отвечающие вектору координат  $\vec{r} = \|0, 0, H\|^T$  при условных значениях высоты точечной цели  $H = 0$  и  $H = 3$  м. Последнее значение выбрано как характерное для наблюдения точечного отражателя на объекте типа самолета, расположенного на технологической площадке.

Приняты следующие параметры СЧМ ЗС: частота начальной частотной компоненты 6 ГГц; число частотных компонент 512 при общей полосе частот 300 МГц и частотном шаге 0,5871 МГц. Перечисленные параметры ЗС обеспечивают разрешение по бистатической дальности 0,5 м и интервал однозначности ее измерения 255,5 м.

Для РК по варианту 1 (см. рис. 1, *а*) результаты расчета сечений ОФН в трех плоскостях  $xу0$ ,  $x0z$  и  $0уз$  представлены для цели с координатами  $\vec{r}_0 = \|0, 0, 3\|^T$  на рис. 2, *а–в*, а для цели с координатами  $\vec{r}_0 = \|0, 0, 0\|^T$  — на рис. 2, *г–е*. Для РК варианта 1 сечения ОФН в плоскости  $xу0$  на рис. 2, *а* и *г* одинаковы, а сечения в плоскостях  $x0z$  и  $0уз$  на рис. 2, *б* и *д*, как и сечения на рис. 2, *в* и *е* попарно существенно различаются ввиду отличий



**Рис. 2.** Диаграммы двумерных сечений ОФН для РК варианта 1 в плоскостях  $xу0$  ( $a, z$ ),  $x0z$  ( $б, д$ ) и  $0yz$  ( $в, e$ ) для цели с  $\vec{r}_0 = \|0, 0, 3\|^T$  ( $a-в$ ) и  $\vec{r}_0 = \|0, 0, 0\|^T$  ( $z-e$ )

заданных координат высоты  $z_0 = 3$  м и  $z_0 = 0$  точечной цели. Разрешающая способность по горизонтальным координатам  $(x, y)$  составляет порядка единиц сантиметров, а по вертикальной координате  $z$  в сечении  $(x, z)$  — около 1 м, что объясняется большими выбранными размерами АС и принятой шириной спектра СЧМ ЗС.

В плоскости  $0yz$  (см. рис. 2, *в* и *е*) имеет место принципиальная неопределенность по координатам горизонтальная дальность–высота, физически поясняемая отсутствием пеленгационной базы в направлении на цель для варианта 1, характерного совмещением передающих и приемных АР.

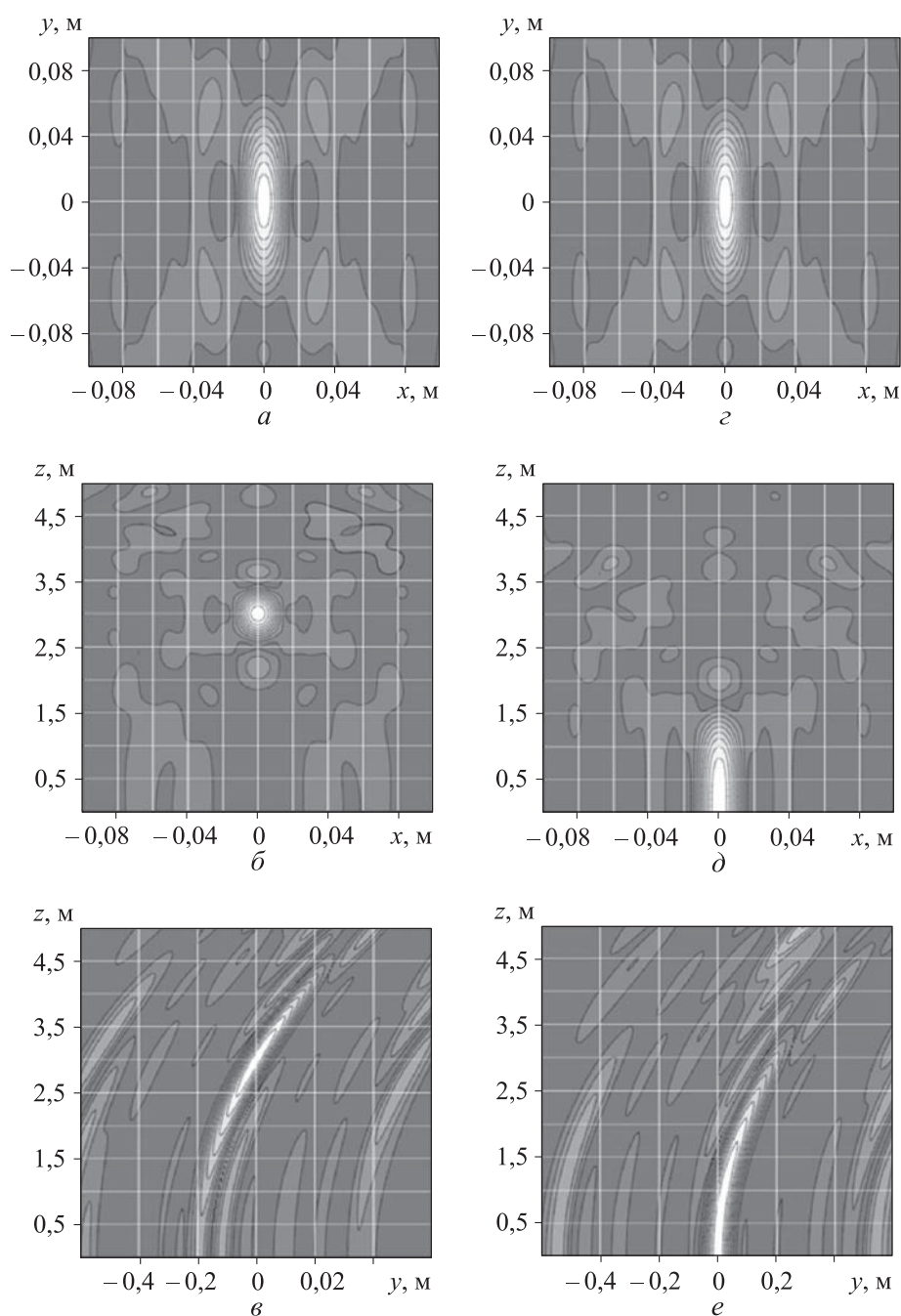
Для РК варианта 2 сечения ОФН в плоскости  $xу0$  (рис. 3, *а* и *г*) одинаковы, а сечения в плоскостях  $x0z$  и  $0yz$  (рис. 3, *б* и *д*, рис. 3, *в* и *е*) также попарно отличаются за счет различий координат высоты цели  $z_0 = 3$  м и  $z_0 = 0$ .

Разрешающие способности в сечениях  $(x, y)$  и  $(x, z)$  аналогичны разрешающим способностям варианта 1. Однако для варианта 2 главные лепестки сечений ОФН в этих плоскостях несколько меньше, а также имеет место уменьшение уровня боковых лепестков. Неопределенность в плоскости  $0yz$  для варианта 2 имеет место только в ограниченных пределах координат горизонтальная дальность–высота, составляя единицы метров и уменьшаясь с увеличением высоты точки цели  $z_0$ . Это является следствием наличия пеленгационной базы в направлении на цель на ненулевой высоте за счет разноса передающих и приемных АР в варианте 2 ММО РК. Данная неопределенность может быть уменьшена при подъеме приемной или передающей АР РК над земной поверхностью на небольшую высоту. Однако это, как уже было отмечено, потребует дополнительного изучения для принятия мер по компенсации интерференционных явлений при отражении от поверхности.

**Фокусировка радиолокационного изображения многоточечного 3D-объекта в наземной ММО-радиокамере.** Алгоритм фокусировки многоточечных стационарных (неподвижных) объектов в ММО РК вытекает из обобщения выражения для ОКИ (5), которое с учетом параметров совокупности рассеивателей с интенсивностями и координатами  $q_p$ ,  $\vec{r}_0^{(p)}$ ,  $p = 0, 1, \dots, P$ , приобретает вид [6]:

$$\begin{aligned} \dot{Q}(\vec{r}) = & \\ = \sum_{n,k=0}^{N_t, N_r} \sum_{p=0}^P q_p \exp \left\{ j(\omega_0 + M\Delta\omega/2) \Delta\tau_{nk} \left( \vec{r}_0^{(p)}, \vec{r} \right) \right\} W \left( \Delta\omega \Delta\tau_{nk} \left( \vec{r}_0^{(p)}, \vec{r} \right) \right). \end{aligned} \quad (9)$$





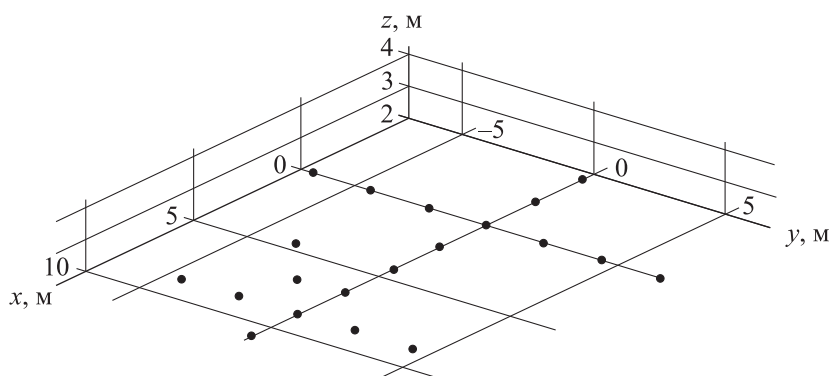
**Рис. 3.** Диаграммы двумерных сечений ОФН для РК варианта 2 в плоскостях  $xy0$  (а, з),  $x0z$  (б, д) и  $0yz$  (в, е) для цели с  $\vec{r}_0 = \|0, 0, 3\|^T$  (а-в) и  $\vec{r}_0 = \|0, 0, 0\|^T$  (з-е)

Для фокусировки использован метод обратных проекций (см., например, [6]) и пороговый алгоритм с порогом  $H$  для построения пространственных точек  $\vec{R}$  радиоизображения в виде квадрата модуля ОКИ, адекватного измерениям ЭПР отражателей:

$$\vec{R} = \underset{\vec{r}}{\arg} \left( \left| \dot{Q}(\vec{r}) \right|^2 \geq H \right). \quad (10)$$

Приведем примеры построения РИ на основе (9), (10) для многоточечной модели самолета с использованием рассмотренных ранее при вычислении сечений ОФН двух вариантов наземной ММО РК, имеющих уже принятые выше характеристики АР и ЗС.

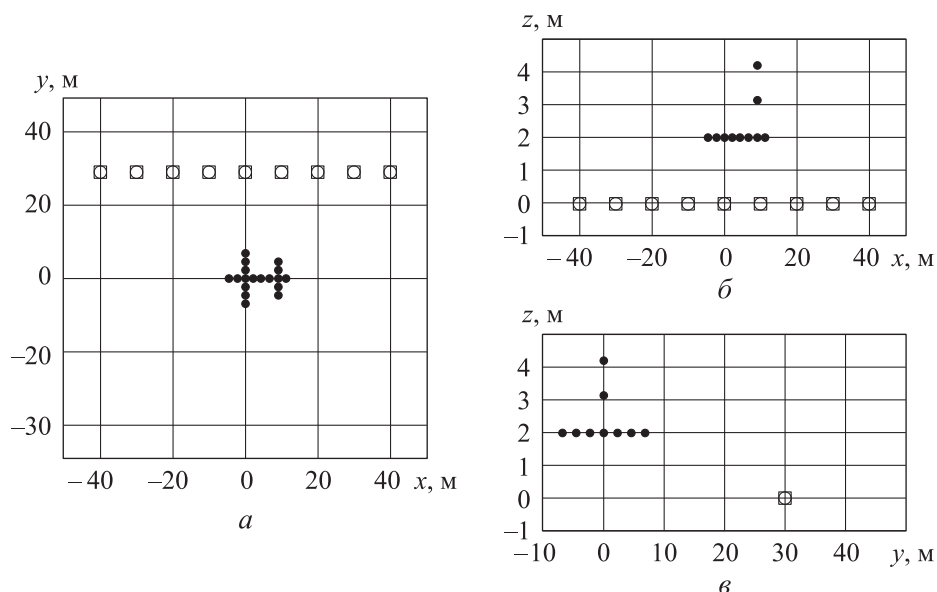
*Получение радиолокационного изображения в ММО-радиокамере варианта 1.* Используем при теоретическом моделировании РИ условную многоточечную 3D-модель самолета с габаритными размерами  $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z = 15,4 \times 13,2 \times 2,2 \text{ м}^3$ , состоящую из 20 точечных отражателей, расположенных так, как показано на рис. 4. Полагаем, что эта точечная модель может быть поднята по вертикальной оси  $z$  на высоту  $z_0 \geq 0$  вплоть до единиц метров над плоскостью земной поверхности  $xу0$ .



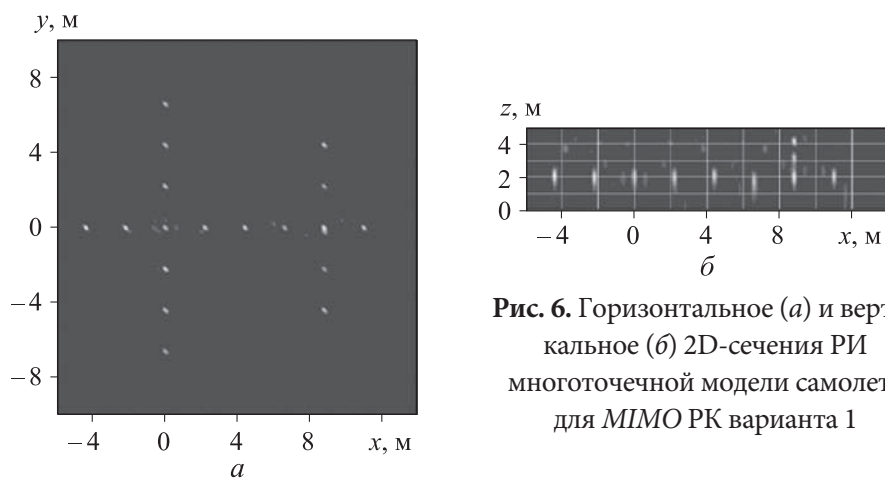
**Рис. 4.** 20-точечная 3D-модель самолета, принятая при расчетах РИ ( $z_0 = 2 \text{ м}$ )

Проекции на ортогональные плоскости  $xу0$ ,  $x0z$  и  $0yz$  многоточечной модели самолета, поднятой на высоту  $z_0 = 2 \text{ м}$  над земной поверхностью, и приемо-передающих элементов РК, находящихся непосредственно в плоскости земной поверхности  $xу0$ , показаны на рис. 5. Расстояние от АР до модели самолета по горизонтальной дальности принято равным 30 м, как и ранее при точечной цели в случае анализа ОФН.

Для варианта 1 ММО РК результаты фокусировки 2D-сечений РИ многоточечной модели в горизонтальной плоскости  $(x, y, z_0)$  показали, что



**Рис. 5.** Расположение приемо-передающих элементов ММО РК варианта 1 и многоточечной модели самолета в трех проекциях на плоскостях  $xy_0$  (а),  $x_0z$  (б) и  $0yz$  (в)



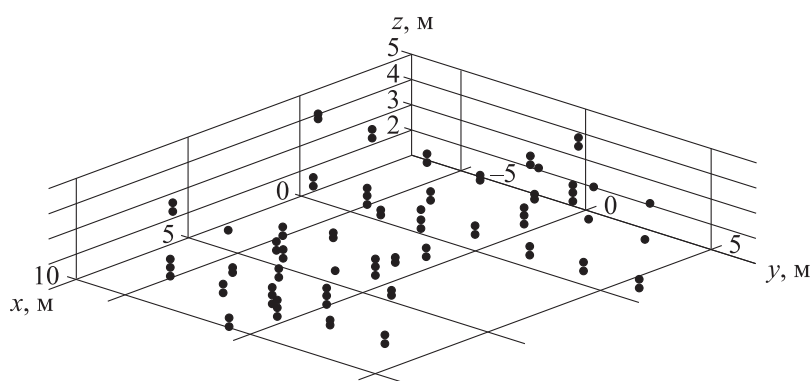
**Рис. 6.** Горизонтальное (а) и вертикальное (б) 2D-сечения РИ многоточечной модели самолета для ММО РК варианта 1

эти РИ мало отличаются по координатам точечных отражателей, сохраняя конфигурацию сечений РИ практически одинаковой в интервале значений  $0 \leq z_0 \leq 4$  м. Поэтому достаточно построения сечения РИ в плоскости  $xuz_0$  при значении  $z_0 = 2$  м (рис. 6, а).

Сечение РИ в вертикальной плоскости  $(x, y_0, z)$  при  $y_0 = 0$  приведены на рис. 6, б при известном положении модели по высоте  $z_0 = 2$  м. Здесь заметны некоторые смещения отметок отражателей по высоте относительно их истинных значений, обусловленные имеющимися неопреде-

ленностями в вертикальной плоскости  $yz$ , а также возможным взаимным влиянием сигналов отражателей.

Результат фокусировки 3D РИ в ММО РК варианта 1 показан на рис. 7.

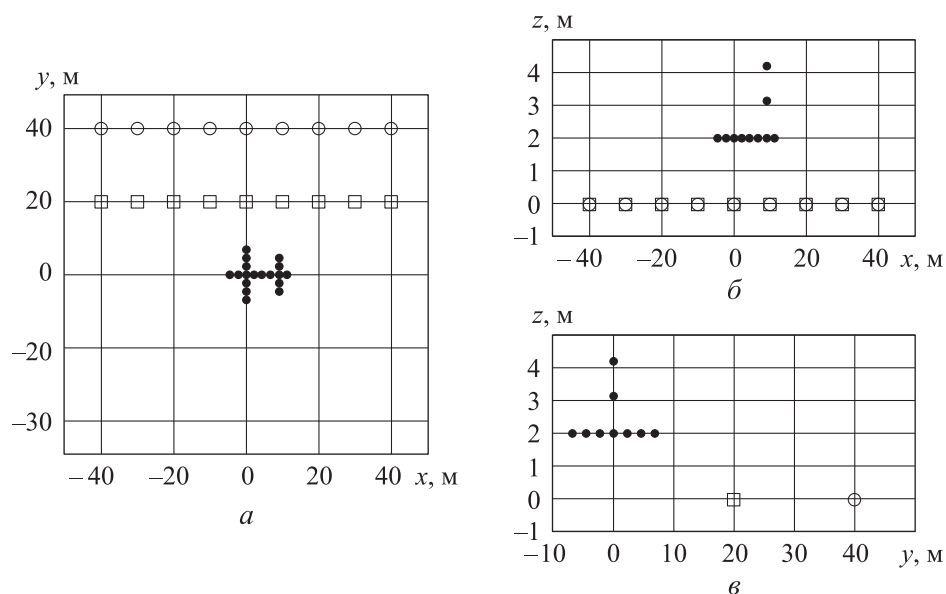


**Рис. 7.** 3D РИ многоточечной модели самолета, сфокусированное в ММО РК варианта 1 ( $z_0 = 2$  м)

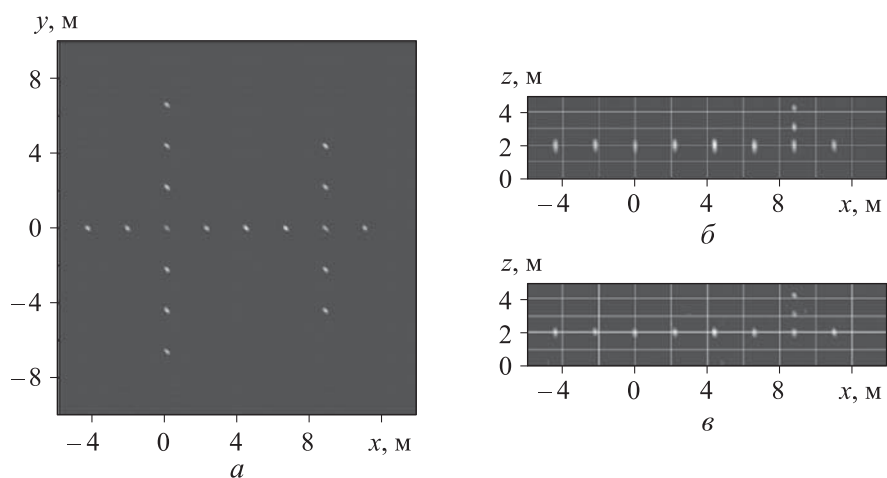
Следует отметить, что несмотря на удовлетворительное качество двумерных сечений ОФН (см. рис. 6), восстановленное 3D РИ на рис. 7 требуемого качества не имеет. Видны размывания точек РИ и артефактов по вертикали относительно точек исходной модели (см. рис. 4), обусловленные наличием неопределенности и боковых лепестков ОФН для РК варианта 1 (сечения ОФН в плоскости  $yz$ , см. рис. 2), а также недостаточным числом отсчетов по координатам, выбранным для уменьшения машинного времени вычисления 3D РИ.

*Получение радиолокационного изображения в ММО-радиокамере варианта 2.* Для варианта 2 ММО РК расположение многоточечной модели самолета и элементов ММО РК показано на рис. 8 в проекциях при тех же параметрах передающей и приемной АР и расстоянии до модели самолета, что и в случае точечной цели при анализе ОФН ММО РК варианта 2.

Результаты фокусировки горизонтального и вертикальных 2D-сечений РИ многоточечной модели для ММО РК варианта 2 приведены на рис. 9. Для варианта 2 с горизонтальным разносом передающей и приемной АР ММО РК имеет место заметное улучшение качества 2D-сечений РИ по сравнению с вариантом 1 (см. рис. 6), для которого такой разнос отсутствует. С увеличением высоты  $z_0$  отражателей над плоскостью  $xu$  разрешение в вертикальных сечениях  $yz$  увеличивается.



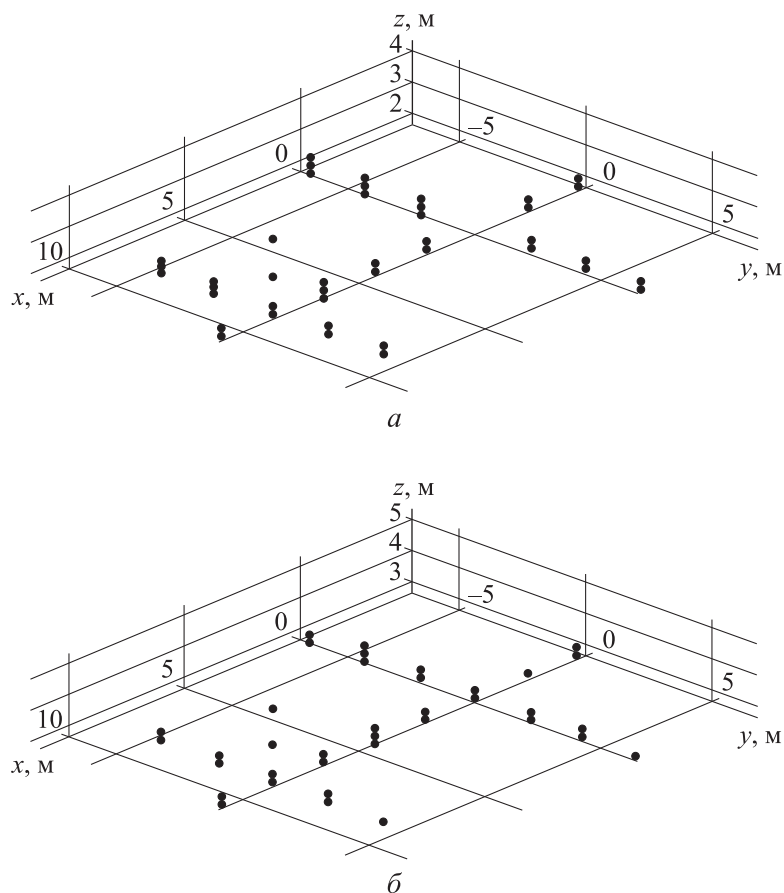
**Рис. 8.** Расположение приемо-передающих элементов *MIMO* РК варианта 2 и многоточечной модели в трех проекциях на плоскостях  $xy$  (а),  $xz$  (б) и  $yz$  (в)



**Рис. 9.** Горизонтальное (а) и вертикальные (б, в) 2D-сечения РИ многоточечной модели самолета для *MIMO* РК варианта 2 при  $z_0 = 2$  (а, б) и 3 м (в)

Этот вывод подтверждается и при фокусировке 3D РИ, результат которой показан на рис. 10 для двух высот расположения точечной модели самолета.

Следовательно, в случае *MIMO* РК варианта 2 на 3D РИ наблюдается заметно меньшее размытие фокусировки точек РИ, а также отсутствие артефактов, обусловленных неопределенностью. Об этом свидетельствует



**Рис. 10.** 3D РИ многоточечной модели самолета, сфокусированное в ММО РК варианта 2 при  $z_0 = 2$  (а) и 3 м (б)

однозначное отображение положения отражателей, расположенных на крыльях, фюзеляже и хвостовой части модели самолета (см. рис. 10), что отсутствовало в варианте 1 при совмещенных передающей и приемной АР ММО РК на результатах фокусировки 3D РИ на рис. 7.

**Заключение.** Приведены результаты теоретического исследования разрешающей способности и фокусировки РИ, которые могут использоваться при определении ЭПР отдельных фрагментов стационарных протяженных объектов с использованием измерительного комплекса на основе наземной ММО РК, которые можно кратко сформулировать следующим образом.

С помощью ОФН по пространственным координатам исследована форма тела неопределенности и разрешающая способность в двумерных сечениях ОФН для двух вариантов ММО РК С-диапазона частот (6 ГГц) с наземным расположением передающих и приемных элементов в виде: 1) эквидистантной сильно разреженной АР из попарно совмещенных пе-

редающих и приемных элементов; 2) разнесенных в земной плоскости эквидистантных и параллельных друг другу передающей и приемной разреженных АР.

В случае использования ЗС с СЧМ и шириной полосы 300 МГц, ортогональных по времени для разных элементов РК варианта 1, получено, что для АР из девяти приемо-передающих элементов с шагом решетки 10 м при расстоянии до точечной цели 30 м разрешающая способность в сечениях ОФН в горизонтальной плоскости составляет единицы сантиметров, а по вертикальной координате — от 1,5 до 0,25 м при увеличении высоты точечной цели в диапазоне значений 0...3 м. Дополнительное улучшение разрешения и снижение уровня боковых лепестков в сечениях имеет место при переходе от варианта 1 к варианту 2 ММО РК.

Анализ сечений ОФН «горизонтальная дальность–высота» показал, что в плоскости  $Oyz$  имеет место область неопределенности, которая принципиально не ограничена по высоте  $z$  для варианта 1 ММО РК и сужается до 1,0...1,5 м по высоте  $z$  и около 0,3 м по горизонтальной дальности  $y$  для варианта 2. Это объясняется наличием вертикальной базы «передача–прием» для разнесенных в горизонтальной плоскости передающих и приемных элементов АР в варианте 2 ММО РК.

Представлены результаты математического моделирования алгоритма восстановления 2D и 3D РИ условной многоточечной 3D-модели самолета с габаритными размерами  $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z = 15,4 \times 13,2 \times 2,2$  м, состоящей из 20 точечных отражателей на крыльях, фюзеляже и хвостовом оперении.

Установлено, что для ММО РК варианта 1 2D-сечения РИ многоточечной модели в горизонтальной плоскости  $(x, y, z_0)$  незначительно отличаются по координатам от истинных отражателей, сохраняя 2D РИ одинаковыми в интервале значений высоты над земной поверхностью  $0 \leq z_0 \leq 4$  м. На сечении РИ в вертикальной плоскости  $(x, y_0, z)$ , проходящей через точку положения модели  $(0, 0, z_0)$  при высоте  $z_0 = 2$  м над земной поверхностью, имеются малые смещения отметок отражателей по высоте относительно истинных значений, что связано с наличием неопределенности в вертикальных плоскостях  $yz$  и возможным взаимным влиянием сигналов отражателей. На восстановленном 3D РИ видно «размножение» по вертикали точек исходной модели, обусловленное наличием неопределенности ОФН для РК варианта 1, качество 3D РИ является неудовлетворительным.

Для варианта 2 ММО РК 2D-сечения РИ многоточечной модели в горизонтальной плоскости  $(x, y, z_0)$  также одинаковы в интервале значений высоты над земной поверхностью  $0 \leq z_0 \leq 4$  м. Сечение РИ в вертикальной

плоскости  $(x, y_0, z)$ , проходящей через точку  $(0, 0, z_0)$  при высоте  $z_0 = 2$  м над земной поверхностью, имеет более компактные отметки отражателей, чем в варианте 1, но малые смещения отметок по высоте сохраняются вследствие имеющейся неопределенности ОФН. На восстановленном 3D РИ «размножение» отметок по вертикали практически отсутствует, что объясняется сужением области неопределенности ОФН для РК варианта 2, а качество 3D РИ приближено к исходной точечной модели и дополнительно улучшается с увеличением высоты положения модели до значения  $z_0 = 3$  м.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на определение оптимального расположения передающих и приемных элементов ММО РК, в том числе возможности подъема элементов АР на мачтовых опорах и, как следствие, на учет влияния помех типа антипода и методов их компенсации.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Стейнберг Б.Д. Экспериментальное определение ЭПО отдельных отражающих частей самолета. *ТИИЭР*, 1989, т. 77, № 5, с. 35–42.
- [2] Attia E.H., Steinberg B.D. Self-cohering large antenna arrays using the spatial correlation properties of radar clutter. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1989, vol. 37, no. 1, pp. 30–38. DOI: 10.1109/8.192160
- [3] Steinberg B.D. Microwave imaging with large antenna arrays: radio camera principles and techniques. NY, Wiley-Interscience, 1983.
- [4] Стейнберг Б.Д. Формирование радиолокационного изображения самолета в диапазоне СВЧ. *ТИИЭР*, 1988, т. 76, № 12, с. 26–46.
- [5] Митрофанов Д.Г. Перспективные способы и устройства распознавания летательных аппаратов. Смоленск, Военная академия войсковой ПВО ВС РФ, 2004.
- [6] Чапурский В.В. Избранные задачи теории сверхширокополосных радиолокационных систем. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.
- [7] Бартон Д.К. Радиолокационное сопровождение целей при малых углах места. *ТИИЭР*, 1974, т. 42, № 6, с. 37–61.

**Чапурский Валерий Викторович** — д-р техн. наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Слукин Геннадий Петрович** — д-р техн. наук, старший научный сотрудник, директор НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).



**Нониашвили Михаил Ильич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Лесников Григорий Александрович** — научный сотрудник НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Чапурский В.В., Слукин Г.П., Нониашвили М.И. и др. Разрешающая способность и радиоизображения стационарных объектов в наземных MIMO-радиокамерах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2019, № 3, с. 77–94. DOI: 10.18698/0236-3933-2019-3-77-94

**GROUND-BASED MIMO MICROWAVE CAMERAS: RESOLUTION AND STATIONARY OBJECT IMAGING**

V.V. Chapurskiy

G.P. Slukin

M.I. Noniashvili

G.A. Lesnikov

valch2008@yandex.ru

niiret@bmstu.ru

min-st-1986@mail.ru

gless@bk.ru

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

---

**Abstract**

The study analysed possible resolution of two ground-based MIMO microwave camera designs by means of two-dimensional spatial cross-sections of a generalized ambiguity function. We used stepped-frequency modulated broadband signals as time-orthogonal probing signals for the microwave camera transmitters. We employed a mathematical simulation of the space-time signal processing system pertaining to MIMO microwave camera receivers to illustrate 2D and 3D microwave imaging of stationary extended multipoint objects situated at various altitudes above the earth surface

**Keywords**

*Multistatic microwave holography, MIMO microwave camera, microwave image, radar cross-section, stepped frequency modulation, generalized correlation integral in correlation processing, space-time processing*

Received 17.12.2018

© Author(s), 2019

---

**REFERENCES**

- [1] Steinberg B.D. Experimental determination of effective cross section of separate reflective aircraft parts. *TIIEP*, 1989, vol. 77, no.5, pp. 35–42 (in Russ.).
- [2] Attia E.H., Steinberg B.D. Self-cohering large antenna arrays using the spatial correlation properties of radar clutter. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1989, vol. 37, no. 1, pp. 30–38. DOI: 10.1109/8.192160

- [3] Steinberg B.D. Microwave imaging with large antenna arrays: radio camera principles and techniques. New York, Wiley-Interscience, 1983.
- [4] Steinberg B.D. Formation of aircraft radar image in microwave band. *TIER*, 1988, vol. 76, no. 12, pp. 26–46 (in Russ.).
- [5] Mitrofanov D.G. Perspektivnye sposoby i ustroystva raspoznavaniya letatel'nykh apparatov [Promising methods and devices of aircraft recognition]. Smolensk, Voen-naya akademiya voyskovoy PVO VS RF Publ., 2004.
- [6] Chapurskiy V.V. Izbrannye zadachi teorii sverkhshirokopolosnykh radiolokatsionnykh system [Selected problems of ultra-wideband radar systems theory]. Moscow, BMSTU Publ., 2012.
- [7] Barton D.K. Radar tracking of targets at small elevation angles. *TIER*, 1974, vol. 42, no. 6, pp. 37–61 (in Russ.).

**Chapurskiy V.V.** — Dr. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Chief Researcher, Research Institute of Radioelectronic Technology, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Slukin G.P.** — Dr. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Head of the Research Institute of Radioelectronic Technology, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Noniashvili M.I.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Radioelectronic Systems and Devices, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Lesnikov G.A.** — Researcher, Research Institute of Radioelectronic Technology, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Chapursky V.V., Slukin G.P., Noniashvili M.I., et al. Ground-based MIMO microwave cameras: resolution and stationary object imaging. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2019, no. 3, pp. 77–94 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2019-3-77-94