

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.10.10>

УДК: 621.391, 621.396

РАДИОГОЛОГРАФИЯ НА ОСНОВЕ МІМО АНТЕННЫХ СИСТЕМ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ СИГНАЛОВ

В.И. Калинин¹, В.В. Чапурский²

¹ Фрязинский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,
141120, Московская область, г. Фрязино, пл. академика Введенского, д.1, Россия

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Статья поступила в редакцию 22 июля 2025 г.

Аннотация. Рассмотрена система радиоголографии на основе МІМО антенных решеток с переизлучением и рециркуляцией многочастотных сигналов в кольце пространственной обратной связи. Построена обобщенная функция неопределенности (ОФН) по пространственным координатам для ансамбля многочастотных ортогональных сигналов с учетом парциальных коэффициентов передачи колец обратной связи. Исследованы характеристики пространственного разрешения в системе радиоголографии с МІМО антенными решетками в СВЧ-диапазоне радиоволн. Приводятся результаты расчета и сравнения двумерных сечений ОФН при наличии и отсутствии рециркуляции зондирующих сигналов. Показана возможность значительного повышения пространственного разрешения в системе радиоголографии на основе МІМО антенных решеток с рециркуляцией многочастотных сигналов в замкнутом кольце, содержащем отражающий объект.

Ключевые слова: МІМО радиоголография, антенная решетка, функция неопределенности, рециркуляция сигналов, пространственное разрешение.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-01110-25-01.

Автор для переписки: Калинин Валерий Иванович, val.kalinin@mail.ru

Введение

Перспективным направлением при разработке широкополосных систем радиолокации, радиосвязи, радиоголографии и беспроводной передачи энергии (Wireless Power Transmission) является применение антенных решеток (АР) с пространственной рециркуляцией сигналов (Retrodirective Antenna Array) [1-5]. RDA широкополосные системы принимают отраженные от цели зондирующие сигналы и автоматически ретранслируют их в направлении облучаемого объекта [6-8]. При этом возникает известный эффект самофокусировки (self-focusing) диаграммы направленности в направлении облучаемого отражателя за счет рециркуляции излучений в пространственном кольце обратной связи, содержащим источник отражений [9]. Отличительным свойством RDA широкополосных систем является автоматическое управление (selfsteering) диаграммой направленности антенн в режиме поиска и сопровождения [2,3].

Для анализа разрешающей способности антенных систем (АС) с пространственной рециркуляцией многомерных ортогональных сигналов используется обобщенная функция неопределенности (ОФН) по пространственным координатам [9-12]. В настоящей работе проводится исследование и сравнительный анализ двумерных сечений ОФН в сферических пространственных координатах для ММО радиоголографии при наличии и отсутствии пространственной рециркуляции многомерных зондирующих сигналов с разделением по спектру.

1. MIMO радиоголография в микроволновом диапазоне

Рассмотрим MIMO антенную систему, которая состоит из $N_t + 1$ передающих и $N_r + 1$ приемных элементов с номерами $n = 0, \dots, N_t$ и $k = 0, \dots, N_r$. Передающие элементы излучают зондирующие сигналы со взаимно ортогональными компонентами, например, с неперекрывающимися спектрами, на средних частотах ω_n с шагом $\Delta\omega$:

$$\dot{s}_n(t) = \dot{A}(t) \exp(j\omega_n t), \quad \omega_n = \omega_0 + n\Delta\omega. \quad (1)$$

Здесь $\dot{A}(t)$ является общей комплексной огибающей с полной шириной спектра $\Delta\omega$. На выходе k -го приемного элемента AP комплексный суммарный сигнал от неподвижного отражателя с вектором координат $\vec{R}$ за счет всех компонент зондирующего сигнала (ЗС), которые излучаются передающими элементами MIMO AP, можно записать в виде суммы независимых или ортогональных компонент:

$$\dot{V}_k(t, \vec{R}) = \sum_{n=0}^{N_t} \dot{v}_{n,k}(t, \vec{R}), \quad (2)$$

где комплексные парциальные сигналы для пары антенных элементов (n, k) «передача-прием» выражаются в виде:

$$\dot{v}_{n,k}(t, \vec{R}) = P(r) \dot{s}_n(t - \tau_{n,k}(\vec{R})). \quad (3)$$

Бистатистические задержки $\tau_{n,k}(\vec{R})$ в (3) для каждой пары элементов (n, k) определяются по формуле:

$$c\tau_{n,k}(\vec{R}) = |\vec{R} - \vec{r}_{tn}| + |\vec{R} - \vec{r}_{rk}| \quad (4)$$

где c – скорость света, $|\vec{r}|$ символ модуля вектора $\vec{r}$, а $\vec{r}_{tn}$ и $\vec{r}_{rk}$ – вектора координат n – ого передающего и k – ого приемного элементов MIMO AC.

В приближении большой дальности $r = |\vec{R}|$ точечного отражателя, много превосходящей размеры антенной системы, $P(r) = K_t K_r q(r)$ в формуле (3) есть произведение множителей усиления антенных элементов K_t и K_r на передачу и на прием, принятых далее одинаковыми для всех пар элементов (n, k) , и множителя ослабления $q(r)$ при распространении сигналов к отражателю.

На выходе каждого приемного канала происходит разделение отраженных от цели ортогональных сигналов с целью их дальнейшей пространственно-временной обработки (ПВО) совместно с опорным векторным сигналом, пришедшим из опорной точки пространства с вектором координат $\vec{R}_0$. Временные задержки опорных сигналов $\tau_{n,k}(\vec{R}_0)$ для каждой пары элементов (n, k) определяются по формуле:

$$\text{с} \tau_{n,k}(\vec{R}_0) = |\vec{R}_0 - \vec{r}_{tn}| + |\vec{R}_0 - \vec{r}_{rk}| \quad (5)$$

Общее число пространственно-частотных или пространственно-временных каналов равно произведению $N_\Sigma = (N_r + 1)(N_t + 1)$. В результате пространственно-временной обработки ортогональных сигналов образуется виртуальная антенная решетка из N_Σ приемопередающих элементов, вид которой зависит от взаимного расположения приемных и передающих элементов исходной антенной системы [10,11].

ММО АС состоит из $N_t + 1 = 25$ передающих и $N_r + 1 = 25$ приемных элементов (рис. 1а). Виртуальная эквидистантная АР (рис. 1б) содержит $(N_r + 1)(N_t + 1) = 625$ виртуальных приемо-передающих элементов и имеет почти вдвое меньший размер $0.54 \times 0.54 \text{ м}^2$, чем размер приемной АР, составляющий $0.9 \times 0.9 \text{ м}^2$. Вся ММО АС и отвечающая ей виртуальная АР находятся в одной плоскости $(x, y, 0)$ декартовой системы координат (x, y, z) .

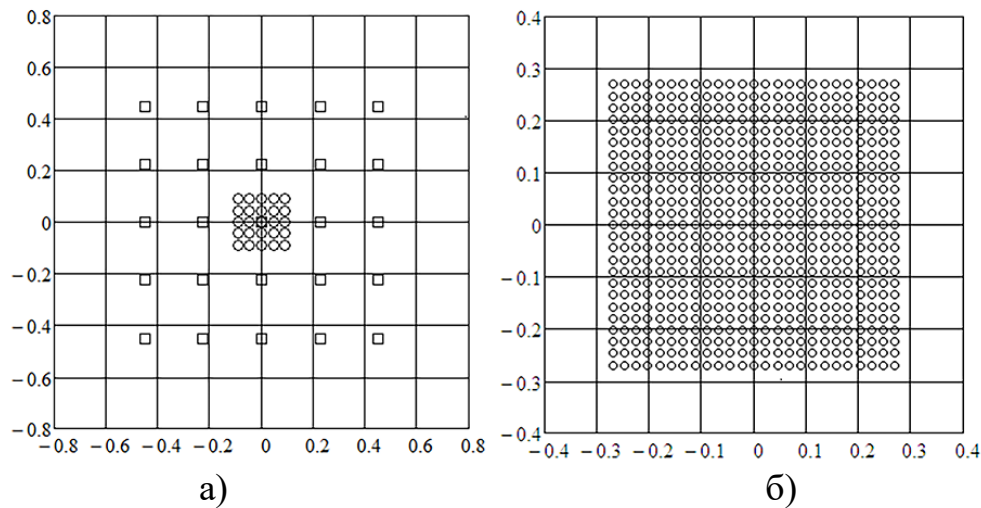


Рис. 1. Структура MIMO AC (а) и соответствующей ей виртуальной AP (б).
Размерности по осям в метрах.

Конфигурация передающей и приемной AP такова, что определяет плотную виртуальную AP, состоящую из приема-передающих элементов и свободную от дифракционных лепестков диаграммы направленности. В этом состоит основной принцип выбора положения элементов и конструирования MIMO AP, позволяющий получить значительную экономию общего числа элементов, в том числе за счет разреженного положения приемных элементов больше половины от длины волны.

При использовании моноимпульсных многочастотных сигналов (1) к передающим элементам MIMO AC одновременно подводятся ортогональные радиоимпульсы на несущих частотах ω_n с прямоугольной огибающей вида $A(t) = A \cdot \text{rect}(t/T)$. Выбор длительности зондирующих импульсов T обусловлен наличием «слепой» зоны на малых дальностях за счет блокирования приема на время T излучения зондирующего импульса. Размер слепой зоны по дальности при импульсном излучении длительностью $T = 0.5$ мкс составляет $\Delta r = cT/2 = 75$ м. При такой длительности импульсов расчеты характеристик системы радиоголографии следует проводить для дальностей вне слепой зоны $r > 75$ м. Зондирующие сигналы имеют следующие параметры: частота начальной частотной компоненты $f_0 = 3$ ГГц; шаг частотных компонент $\Delta f = 25$ МГц; число частотных компонент соответствует количеству передающих элементов

и равно $N_t = 25$; полная ширина полосы для многочастотных излучений $\Delta F = N_t \Delta f = 625$ МГц; длительность импульса $T = 0.5$ мкс намного превышает время его когерентности $\tau_c \approx 1 / \Delta f = 0,04$ мкс; длина волны $\lambda_0 = 10$ см на начальной частоте $f_0 = 3$ ГГц.

2. Обобщенный корреляционный интеграл

В настоящей работе мы ограничимся случаем неподвижной отражающей цели. Функцию неопределенности для парциального канала ПВО с парой антенных элементов (n, k) и неподвижным отражателем можно определить в спектральной области согласно формулам Винера-Хинчина [12] в виде комплексного корреляционного интеграла:

$$H(\vec{R}, \vec{R}_0) = \int_{-\Delta\omega/2}^{\Delta\omega/2} \exp\left\{j(\omega + \omega_n) \left[\Delta\tau_{n,k}(\vec{R}, \vec{R}_0) \right]\right\} |\dot{G}_A(\omega)|^2 d\omega, \quad (6)$$

где $\dot{G}_A(\omega)$ – спектр комплексной огибающей $\dot{A}(t)$ и введено приращение задержки в парциальном канале ПВО:

$$\Delta\tau_{n,k}(\vec{R}, \vec{R}_0) = \tau_{n,k}(\vec{R}_0) - \tau_{n,k}(\vec{R}). \quad (7)$$

Обобщенный корреляционный интеграл (ОКИ) для многоэлементной антенной решетки согласно [10] получаем в виде:

$$\dot{Q}(\vec{R}; \vec{R}_0) = \sum_{k=0}^{N_r} \sum_{n=0}^{N_t} \int_{-\Delta\omega/2}^{\Delta\omega/2} \exp\left\{j(\omega + \omega_n) \left[\Delta\tau_{n,k}(\vec{R}, \vec{R}_0) \right]\right\} |\dot{G}_A(\omega)|^2 d\omega, \quad (8)$$

где двойное суммирование производится по всем парциальным каналам и введены приращения задержек (7) для каждой пары (n, k) элементов.

Обобщенная функция неопределенности (ОФН) для ММО АС определяется в результате нормировки модулей ОКИ (8) в виде:

$$\Psi(\vec{R}; \vec{R}_0) = \frac{|\dot{Q}(\vec{R}; \vec{R}_0)|}{|\dot{Q}(\vec{R}_0; \vec{R}_0)|} \quad (9)$$

Анализ пространственного разрешения точечного отражателя в ММО системе радиоголографии проведен в результате расчета ОФН по формуле (9) с учетом выражений для обобщенного корреляционного интеграла при наличии и отсутствии пространственной рециркуляции сигналов.

3. ММО антенная система с пространственной рециркуляцией сигналов

При рециркуляции каждая из ортогональных компонент (1) зондирующего сигнала $\dot{s}_n(t)$, $n = 0, 1, \dots, N_t$, излучаемых ММО АС, многократно распространяется в замкнутом пространственном кольце обратной связи « n -ый передающий элемент АС с вектором координат $\vec{r}_{tn}$ – отражатель с вектором координат $\vec{R}$ – k -ый приемный элемент АС с вектором координат $\vec{r}_{rk}$ – n -ый передающий элемент». Набор парциальных колец обратной связи с задержками $\tau_{n,k}(\vec{R})$ и общим коэффициентом передачи γ представляет собой систему из $N_\Sigma = (N_r + 1)(N_t + 1)$ гребенчатых фильтров по аналогии со случаем шумовой РЛС, рассмотренной в работе [6]. Комплексный коэффициент передачи гребенчатого фильтра для каждой пары антенных элементов (n, k) с точностью до постоянного множителя составит:

$$\dot{K}_{nk}(\omega; \vec{R}) = \frac{\exp(-j\omega\tau_{nk}(\vec{R}))}{1 - \gamma \exp(-j\omega\tau_{nk}(\vec{R}))}. \quad (10)$$

В знаменателе формулы (10) величина γ есть коэффициент передачи в пространственной петле обратной связи. Коэффициент γ полагаем общим для всех гребенчатых фильтров с учетом условия устойчивости $0 < \gamma < 1$.

При рециркуляции зондирующих многочастотных сигналов и отсутствии перекрытия спектров ортогональных компонент (1) можно определить обобщенный корреляционный интеграл для ММО системы радиоголографии в виде:

$$\dot{Q}(\vec{R}; \vec{R}_0) = \sum_{k=0}^{N_r} \sum_{n=0}^{N_t} \int_{-\Delta\omega/2}^{\Delta\omega/2} \dot{K}_{nk}(\omega + \omega_n; \vec{R}) \dot{K}_{nk}^*(\omega + \omega_n; \vec{R}_0) |\dot{G}_A(\omega)|^2 d\omega. \quad (11)$$

Последующие расчеты и численное моделирование ОФН проводились на основе анализа модулей ОКИ в соответствии с формулами (8-11) для ортогональных компонент ЗС вида (1), которые являются многочастотными прямоугольными радиоимпульсами длительности T и амплитуды A на частотах $\omega_n = \omega_0 + n\Delta\omega$, одновременно излучаемыми всеми передающими элементами. В (8) и (11) квадрат модуля спектра огибающей для радиоимпульса задается выражением:

$$|\dot{G}_A(\omega)|^2 = A^2 T^2 \left[\frac{\sin(\omega T/2)}{\omega T/2} \right]^2, \quad (12)$$

При исследовании систем радиоголографии традиционно используются сферические координаты дальность-азимут-угол места (r, β, ε) . Полагаем, что ММО АС находится в горизонтальной плоскости $(x, y, 0)$, ее условный центр совпадает с началом координат, а нормаль к АС совпадает с осью Oz . Переход от сферических координат к декартовым имеет вид:

$$\begin{cases} x = r \sin \varepsilon, \\ y = r \cos \varepsilon \sin \beta, \\ z = r \cos \varepsilon \cos \beta. \end{cases} \quad (13)$$

Последующие примеры расчета ОФН (9) в сферических координатах (13) использовали выражения (8), (11) для обобщенного корреляционного интеграла при выбранных координатах цели.

4. Сравнительный анализ двумерных проекций ОФН

Для сравнения пространственной разрешающей способности ММО радиоголографии при отсутствии и наличии рециркуляции рассчитаны два вида двумерных (2D) проекций ОФН: в плоскости азимут-угол места « $\beta_0 - \varepsilon_0$ » и в плоскости дальность-угол места « $r_0 - \varepsilon_0$ ». Расчеты проводились при одних и тех же параметрах ММО антенной системы и зондирующих многочастотных сигналов вида (1) для разных дальностей r до точечного отражателя.

В случае традиционной ММО радиоголографии при отсутствии рециркуляции рассчитаны по формулам (8), (9) картины 2D проекций ОФН, представленные на рис. 2 а,б при удалении цели $r = 100$ м.

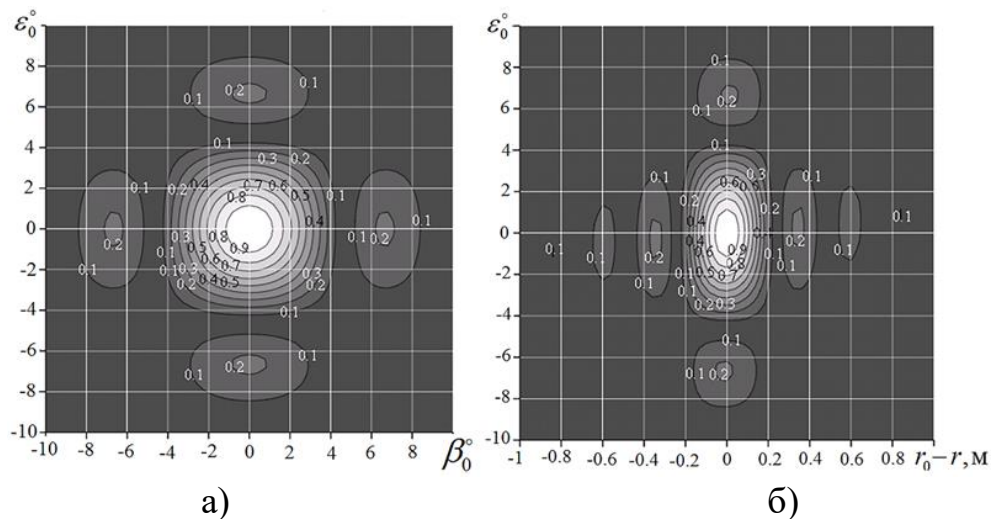


Рис. 2. Двумерные проекции ОФН «азимут-угол места» (а) и «дальность-угол места» (б). Рециркуляция отсутствует. Обозначения по осям – градусы и метры.

Формы сечений ОФН при отсутствии рециркуляции не зависят от изменения расстояния до точечной цели r в дальней зоне наблюдения и от малого удаления цели относительно нормали к центру ММО АС. Параметры ММО АС и зондирующих сигналов составляют: внешний размер приемной антенной решетки $L \times L = 0.9 \times 0.9$ м², средняя частота сигналов $f_m = 3312,5$ МГц и полоса частот $\Delta F = N_t \Delta f = 625$ МГц. Угловую ширину диаграммы направленности приемной антенной решетки можно оценить в виде $\Delta(\varepsilon, \beta) = 360^\circ / (2\pi f_m L) = 5,77$ град. Здесь c – скорость света. Разрешение по дальности определяется отношением

$\Delta r = c / (2\Delta F) = 24$ см. Полученные значения для разрешения по угловым координатам и дальности соответствуют характеристикам двумерных сечений ОФН на рис. 2а,б для традиционной антенной решетки.

При рециркуляции зондирующих сигналов в пространственном кольце с коэффициентом передачи $\gamma = 0.7$ топографические диаграммы двумерных сечений ОФН «азимут-угол места» и «дальность-угол места» рассчитаны по формулам (9), (11). Результаты расчетов представлены на рис. 3а,б при дальности до цели $r = 100$ м, а на рис. 4а,б при $r = 500$ м.

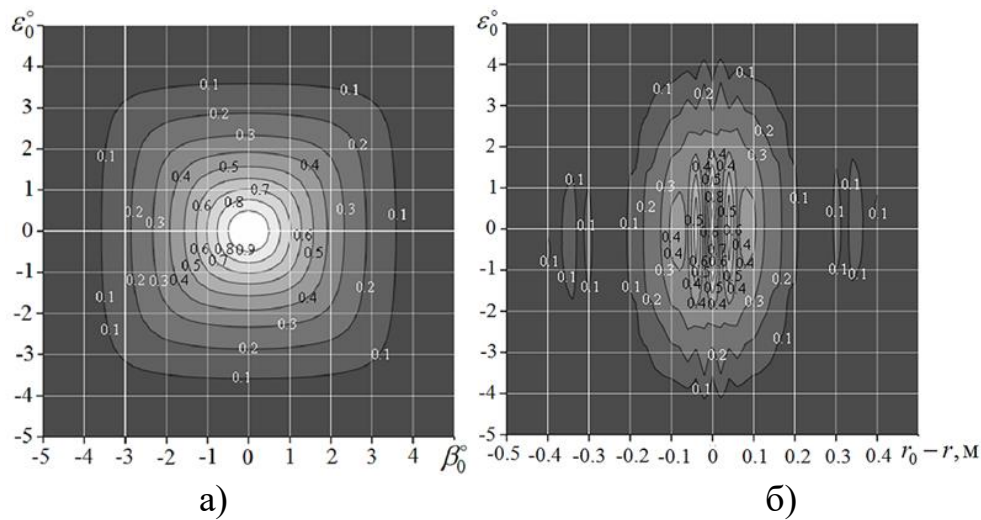


Рис. 3. Двумерные проекции ОФН «азимут-угол места» (а) и «дальность-угол места» (б). Рециркуляция при $\gamma = 0.7$ и дальности до цели $r = 100$ м.

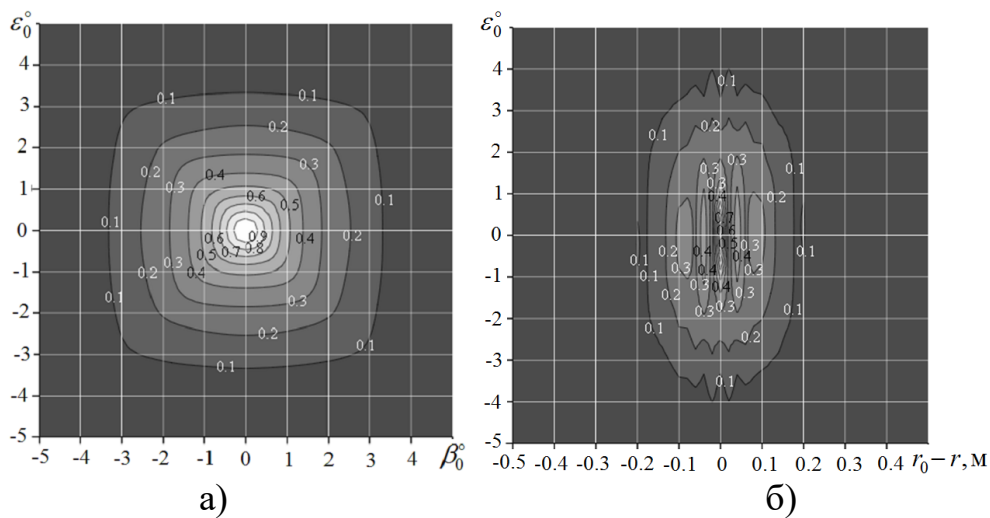


Рис. 4. Двумерные проекции ОФН «азимут-угол места» (а) и «дальность-угол места» (б). Рециркуляция при $\gamma = 0.7$ и дальности до цели $r = 500$ м.

Сопоставление рассчитанных проекций «азимут-угол места» при отсутствии (рис. 2а) и наличии (рис. 3а, 4а) рециркуляции с учетом сокращения в два раза масштаба по осям на рис. 3а, 4а свидетельствует о значительном уменьшении угловой ширины главного лепестка ОФН вследствие рециркуляции зондирующих сигналов. Анализ угловых проекций ОФН показал, что при рециркуляции (рис. 4а) подавляются боковые лепестки ОФН, присущие традиционной радиоголографии (рис. 2а). Расчет проекций «дальность – угол места» на рис. 2б, и 3б, 4б подтверждает уменьшение ширины главного лепестка ОФН по дальности r , а также свидетельствует о подавлении боковых лепестков ОФН в случае пространственной рециркуляции сигналов. Сокращение более чем в два раза ширины главного лепестка ОФН как в сечениях «азимут-угол места», так и в сечениях «дальность-угол места» характеризует эффект пространственного сверхразрешения в системе ММО радиоголографии с рециркуляцией зондирующих многочастотных сигналов в кольце обратной связи, содержащем точечный отражатель. Из сравнения 2D сечений ОФН на рис. 3, 4 следует, что при пространственной рециркуляции сигналов имеет место нетривиальный факт уменьшения угловой ширины главных лепестков ОФН по мере увеличения дальности r до точечного отражателя от 100 м до 500 м.

Заключение

Проведено исследование методов радиоголографии на основе ММО антенных систем с рециркуляцией многочастотных сигналов в петле пространственной обратной связи, содержащей точечный отражатель. Получены аналитические выражения для обобщенных функций неопределенности (ОФН) в спектральной области, учитывающие частотные коэффициенты передачи парциальных пространственных каналов распространения сигналов в случае рециркуляции и при ее отсутствии. В результате численного расчета нормированных ОФН в сферических координатах построены двумерные проекции «азимут-угол места» и «дальность-угол места». На основе оценки ширины главного лепестка при низком уровне боковых выбросов ОФН

проведено сравнение разрешающей способности дистанционного зондирования точечного отражателя в ММО системе традиционной радиолокации и в случае пространственной рециркуляции ортогональных сигналов.

Обнаружено сужение более чем в два раза главного лепестка ОФН как в проекциях «азимут-угол места», так и в проекциях «дальность-угол места» при рециркуляции сигналов с большим $\gamma \geq 0.7$ коэффициентом передачи. Проведенные исследования свидетельствуют о возникновении эффекта пространственного сверхразрешения в системе ММО радиоголографии с рециркуляцией зондирующих сигналов в пространственном кольце обратной связи, содержащем отражающий объект.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-01110-25-01.

Литература

1. Pon C. Y. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – March 1964. – No.2. – P. 176 – 180.
2. Malyuskin O. & Fusco V. Antenna Terminals based on Ultra-Compact Retrodirective Antenna Arrays. // Microwaves, Antennas and Propagation Journal. – 2017. – 11(15). – pp. 2185 – 2193.
3. Fusco V., Buchanan N. Developments in retrodirective array technology. // IET Microw. Antennas Propagat. – 2013. – vol. 7. – no. 2. – pp. 131 – 140.
4. Miyamoto R.Y. and Itoh T. Retro-directive arrays for wireless communications. // IEEE Microw. Mag. – 2002. – vol. 3. – no. 1. – pp. 71 – 79.
5. Li Y., Jandhyala V. Design of retrodirective antenna arrays for short-range wireless power transmission. // IEEE Trans. Antenn. Propag. – 2012. – 60(1). – pp. 206 – 211. <https://doi.org/10.1109/TAR2011.2167897>
6. Быстров Р.П., Кузмичев В.Е. Шумовые РЛС с гребенчатыми фильтрами в устройстве обработки сигналов. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2015. – вып. 8. – С. 47 – 54.

7. Калинин В.И., Чапурский В.В., Черепенин В.А. Радиоголография высокого разрешения на основе многоэлементных антенных решеток с пространственной рециркуляцией сигналов. // VII Всеросс. Микроволновая конф. – 25 – 27 ноября 2020. – Москва. – доклады. – стр.139 – 149. <https://doi.10.1109/RMC50626.2020.9312268>
8. Чапурский В.В., Калинин В.И., Бугаев А.С., Разевиг В.В. Метод рециркуляции сигналов в задаче наблюдения точечного объекта над металлической поверхностью. // Журнал технической физики. – 2019. – том 89. – вып. 8. – с. 1265 – 1270. <https://doi.10.21883/JTF.2019.08.47901.272-1>
9. Skolnik M.I. and King D.D. Self-phasing array antennas. // IEEE Trans. Antennas Propag. – Feb. 1964. – Vol. AP-12. – pp. 142 – 149.
10. Чапурский В. В., Слукин Г. П. Прикладные задачи теории ММО систем радиолокации и радиоголографии. // Под ред. Слукин Г. П., Чапурский В. В. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2024, – 275 с. : – ISBN 978-5-7038-6393-0. <https://press.bmstu.ru/catalog/item/8333/>
11. Калинин В.И., Чапурский В.В., Черепенин В.А. Сверхразрешение в системах радиолокации и радиоголографии на основе ММО антенных решеток с рециркуляцией сигналов. // Радиотехника и электроника. – 2021. – том 66.– № 6. – с. 614 – 624. <https://doi.10.31857/S0033849421060139>
12. Bendat Julius S., Piersol Allan G. Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis. // Wiley Interscience Publication. New York. – 1980. (Пер. с англ. Бендат Дж., Пирсол А. Применения корреляционного и спектрального анализа. – М.: Мир. – 1983).

Для цитирования:

Калинин В.И., Чапурский В.В. Радиоголография на основе ММО антенных систем с пространственной рециркуляцией сигналов. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.10.10>