

УДК 621.391, 621.396

ОБОБЩЕННАЯ ФУНКЦИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В МУЛЬТИСТАТИЧЕСКОЙ РАДИОГОЛОГРАФИИ С РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ СИГНАЛОВ

В.И. Калинин¹, В.В. Чапурский²

¹ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
РАН, 141120, Московская область, г. Фрязино, пл. академика Введенского, д.1

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

Статья поступила в редакцию 16 апреля 2018 г.

Аннотация. Получены выражения для обобщенной функции неопределенности (ОФН) по пространственным координатам для рециркулированных сигналов в мультистатической радиоголографической системе с двумерными передающей и приемной антенными решетками (АР). Рассмотрены два вида ортогональных регулярных сигнальных компонент, излучаемых передающими элементами АР: не перекрывающиеся по спектру сигналы с линейной частотной модуляцией и моноимпульсные многочастотные сигналы. Проведено сравнение ОФН в случае наличия и отсутствия рециркуляции.

Ключевые слова: мультистатическая радиоголография, обобщенная функция неопределенности, рециркуляция сигналов, антенная решетка.

Abstract. Generalized ambiguity function versus spatial coordinates is obtained for orthogonal signals recirculated in the multistate radio holography system using two-measure transmitter and receiver antenna arrays. Two kind of orthogonal regular signal ensembles are considered: linear frequency modulation signals with uncovered spectrum and monopulse multi frequency signals. Each element of a transmission array can radiate a signal with a certain spectral width and its own center frequency from a frequency grid. New target observation method is based on the recirculation of orthogonal regular signals in a spatial feedback loop formed by the radio holography system and the target. The recirculation method is implemented by means of tapping,

amplification, and feeding of a portion of the received signal into the transmitting circuit, where this signal is combined with the current signal generated by a transmitter source. The obtained sum signal is again radiated toward the target. With the use of transmitting array with orthogonal signals, the recirculation method can be implemented in each antenna element.

Spatial resolution analysis of radio holography systems with antenna arrays is based on a construction of an averaged multidimensional generalized ambiguity function (GAF). Detailed study of generalized ambiguity function and the 2D its sections along spatial coordinates allows estimation of the spatial and angular resolutions; GAF sidelobe level; and the possibility of unambiguous measurements of the delay (range) and the angular coordinates for different combinations of the aperture dimensions, the number of elements, and the frequency spacing of the orthogonal regular signals radiated by the array elements. The GAF functions are constructed and calculated in result of the space-time signal processing with the use of the averaged complex correlation integral of the reference and received vector signals.

Generalized ambiguity functions are compared in two cases - presence or absence of a signal recirculation in a spatial feedback loop. Recirculation affect causes significant narrowing (some times) of GAF main lobe that is equality to enhance the spatial resolution of a point reflector when a transmission coefficient of a spatial loop achieves 0.7-0.9 values. In that case, GAF sidelobe levels are sharply decreased and it is appeared the possibility of unambiguous measurements of the delay (range) and the angular coordinates.

are compared in two cases - presence or absence of the signal recirculation.

Key words: multistate radio holography system, generalized ambiguity function, signal recirculation, antenna array.

Введение

Исследование антенных решеток (АР) с рециркуляцией сигналов берет свое начало от пионерских работ [1, 2], а их применение в радиолокации рассматривалось в [3-5]. Теме шумовой радиолокации с рециркуляцией

сигналов посвящены работы [4-8]. В последние годы интерес к системам с рециркуляцией сигналов и число публикаций по практическим аспектам их применения (см., например [9-12]) заметно увеличилось. Вместе с тем вне поля исследований оказалась задача применения метода рециркуляции в мультистатической радиоголографии (МРГ) [13, 14]. Потому на первом этапе исследований по этой теме несомненный интерес представляет получение и анализ обобщенной функции неопределенности (ОФН) по пространственным координатам в МРГ с рециркуляцией сигналов в антенных решетках. Рециркуляция ортогональных сигналов происходит в пространственном кольце распространения для каждой пары «передающий элемент - точка пространства - приемный элемент – передающий элемент». Важным условием является использование адекватных для радиоголографии регулярных и в совокупности широкополосных (ШП) или сверхширокополосных (СШП) компонент зондирующих сигналов ортогональных для различных передающих элементов антенной решетки согласно известным принципам ММО [13,14].

В соответствии с изложенными задачами данной работы являются:

- определение и анализ ОФН по пространственным координатам в системе МРГ с рециркуляцией регулярных сигналов;
- сравнение ОФН в МРГ с рециркуляцией и без рециркуляции, в том числе для двух видов ортогональных компонент зондирующих сигналов (ЗС) - моноимпульсного многочастотного (ММЧ) ЗС с гармоническими компонентами и ММЧ ЗС с неперекрывающимися по спектру ЛЧМ компонентами.

1. Обобщенная функция неопределенности для ансамбля ортогональных сигналов

1.1. Отсутствие рециркуляции

Поскольку в дальнейшем предполагается сравнение ОФН для случаев рециркулированных и нерециркулированных сигналов, приведем сначала результаты при отсутствии рециркуляции в системе МРГ.

ОФН по пространственным координатам [14] определяется формулой

$$\Psi(\vec{R}; \vec{R}_0) = \frac{|\dot{Q}(\vec{R}; \vec{R}_0)|}{|\dot{Q}(\vec{R}_0; \vec{R}_0)|}, \quad (1)$$

в которой $|\circ|$ - символ взятия модуля, $\dot{Q}(\vec{R}; \vec{R}_0)$ - комплексный обобщенный корреляционный интеграл обработки (ОКИ) для сигнала, отраженного от точечной цели с вектором координат \vec{R} , с опорным сигналом, пришедшим из точки пространства с вектором координат \vec{R}_0 . ОФН (1) нормирована, т.е. $\Psi(\vec{R}; \vec{R})=1$ и, следовательно, пропорциональна модулю $|\dot{Q}(\vec{R}; \vec{R}_0)|$. Комплексный ОКИ вычисляется в предположении, что антенная система типа ММО 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 ЗС с взаимно ортогональными компонентами с неперекрывающимися спектрами на частотах ω_n с шагом $\Delta\omega$ и общей комплексной огибающей $\dot{A}(t)$ [14]:

$$\dot{s}_n(t) = \dot{A}(t) \exp(j\omega_n t), \quad \omega_n = \omega_0 + n\Delta\omega, \quad (2)$$

$\dot{A}(t)$ есть огибающая сигнала при ширине ее спектра $\Delta\omega$. Для этих условий ОКИ получаем в виде [15]:

$$\dot{Q}(\vec{R}; \vec{R}_0) = \sum_{k=0}^{N_r} \sum_{n=0}^{N_t} \int_{-\Delta\omega/2}^{\Delta\omega/2} \exp\left\{j(\omega + \omega_n) \left[\Delta\tau_{n,k}(\vec{R}, \vec{R}_0) \right]\right\} |\dot{G}_A(\omega)|^2 d\omega, \quad (3)$$

где $\dot{G}_A(\omega)$ - спектр огибающей $\dot{A}(t)$, и введены приращения задержек:

$$\Delta\tau_{n,k}(\vec{R}, \vec{R}_0) = \tau_{n,k}(\vec{R}_0) - \tau_{n,k}(\vec{R}). \quad (4)$$

Бистатистические задержки в (4) равны

$$\tau_{n,k}(\vec{R}) = c^{-1} \left\{ |\vec{R} - \vec{r}_m| + |\vec{R} - \vec{r}_{rk}| \right\}, \quad (5)$$

где c - скорость света, $|\vec{r}|$ - символ модуля вектора \vec{r} , а \vec{r}_m и \vec{r}_{rk} - вектора координат n -ого передающего и k -ого приемного элементов АР в системе МРГ.

1.2. Наличие рециркуляции

При наличии рециркуляции в пространственном кольце обратной связи с задержкой распространения $\tau_{n,k}(\vec{R})$ для пары элементов (n,k) коэффициент передачи кольца при большом (в пределе бесконечном) числе рециркуляций) с точностью до постоянного множителя составит [8]:

$$\dot{K}_{nk}(\omega; \vec{R}) = \frac{\exp(-j\omega\tau_{nk}(\vec{R}))}{1 - \gamma \exp(-j\omega\tau_{nk}(\vec{R}))}. \quad (6)$$

В формуле (6) γ есть коэффициент передачи в пространственной петле обратной связи, $0 < \gamma < 1$. При этом спектр Фурье $\tilde{v}_{nk}(j\omega)$ сигнала $v_{nk}(t)$ на выходе рециркулятора при отражении от точечной цели с вектором координат \vec{R} равен

$$\tilde{v}_{nk}(j\omega; \vec{R}) = \dot{K}_{nk}(\omega; \vec{R}) \tilde{s}_n(j\omega) = \dot{K}_{nk}(\omega; \vec{R}) \dot{G}_A(\omega - \omega_n), \quad (7)$$

поскольку $\tilde{s}_n(j\omega) = \dot{G}_A(\omega - \omega_n)$ - есть спектр Фурье сигнала (2) излучения n -ого передающего элемента AP.

С учетом (7) и того, что спектр рециркулированного опорного сигнала для опорной точки пространства \vec{R}_0 равен $\tilde{v}_{nk}(j\omega; \vec{R}_0)$, ОКИ при наличии рециркуляции и отсутствии перекрытия спектров компонент (2) может быть получен в виде:

$$\dot{Q}(\vec{R}; \vec{R}_0) = \sum_{k=0}^{N_r} \sum_{n=0}^{N_t} \int_{-\Delta\omega/2}^{\Delta\omega/2} \dot{K}_{nk}(\omega + \omega_n; \vec{R}) \dot{K}_{nk}^*(\omega + \omega_n; \vec{R}_0) |\dot{G}_A(\omega)|^2 d\omega. \quad (8)$$

В дальнейшем расчеты по формулам (3) и (8) проводились для двух видов модуля спектра сигналов $|\dot{G}_A(\omega)|$: 1) прямоугольный постоянный спектр в полосе частот $|\omega| \leq \Delta\omega/2$, что приближенно соответствует компонентам излучаемых сигналов (2) с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) при больших базах ЛЧМ импульса, и 2) немодулированным гармоническим

сигналам, которым соответствует с точностью до постоянного коэффициента спектральная функция вида дельта-функции $|\dot{G}_A(\omega)|^2 = \delta(\omega)$. В последнем случае вместо (3) и (8) будем иметь:

$$\dot{Q}(\vec{R}; \vec{R}_0) = \sum_{k=0}^{N_r} \sum_{n=0}^{N_t} \exp\left\{j\omega_n \Delta\tau_{n,k}(\vec{R}, \vec{R}_0)\right\}, \quad (9)$$

$$\dot{Q}(\vec{R}; \vec{R}_0) = \sum_{k=0}^{N_r} \sum_{n=0}^{N_t} \dot{K}_{nk}(\omega + \omega_n; \vec{R}) \dot{K}_{nk}^*(\omega + \omega_n; \vec{R}_0). \quad (10)$$

Последующие примеры сопоставительных расчетов ОФН проводились на основе модулей ОКИ $|\dot{Q}(\vec{R}; \vec{R}_0)|$ в соответствии с формулами (3) и (8).

2. Примеры анализа сечений ОФН при отсутствии и наличии рециркуляции

В качестве примера рассматривалась система МРГ в диапазоне коротких сантиметров с передающей АР из $N_t + 1 = 25$ элементов и излучением ими сигнальных компонент с центральными частотами $f_n = \omega_n / 2\pi$ при начальной частоте $f_0 = 20$ ГГц и постоянном шаге частотных компонент $\Delta f = 200$ МГц. Суммарная ширина спектра излучения всех ЛЧМ компонент составила при этом $\Delta F = 5$ ГГц. Средняя длина волны зондирующего сигнала равняется $\lambda_{cp} = 1.33$ см, которая отвечает средней частоте $f_{cp} = 22.5$ ГГц. Число элементов приемной АР $N_r + 1 = 25$. Каждая из решеток двумерная, они лежат в плоскости (x, y) и имеют постоянный шаг по координатам. Расположение АР показано на рис. 1.

Эквидистантная приемная АР имеет шаг $L_r = 22$ см, что значительно превышает половину средней длины волны $\lambda_{cp}/2 = 0.66$ см. При этих условиях двумерная приемная АР является сильно разреженной. Передающая двумерная АР, расположенная на плоскости (x, y) внутри приемной АР, также содержит (5×5) эквидистантных излучателей с шагом $L_t = 5$ см, значительно

превышающем половину средней длины волны.

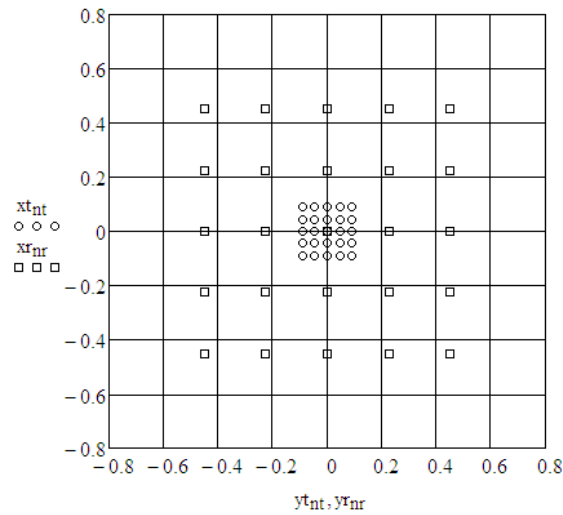


Рис.1. Расположение элементов передающей (кружки) и приемной (квадраты) эквидистантных АР. Расстояния по осям в метрах.

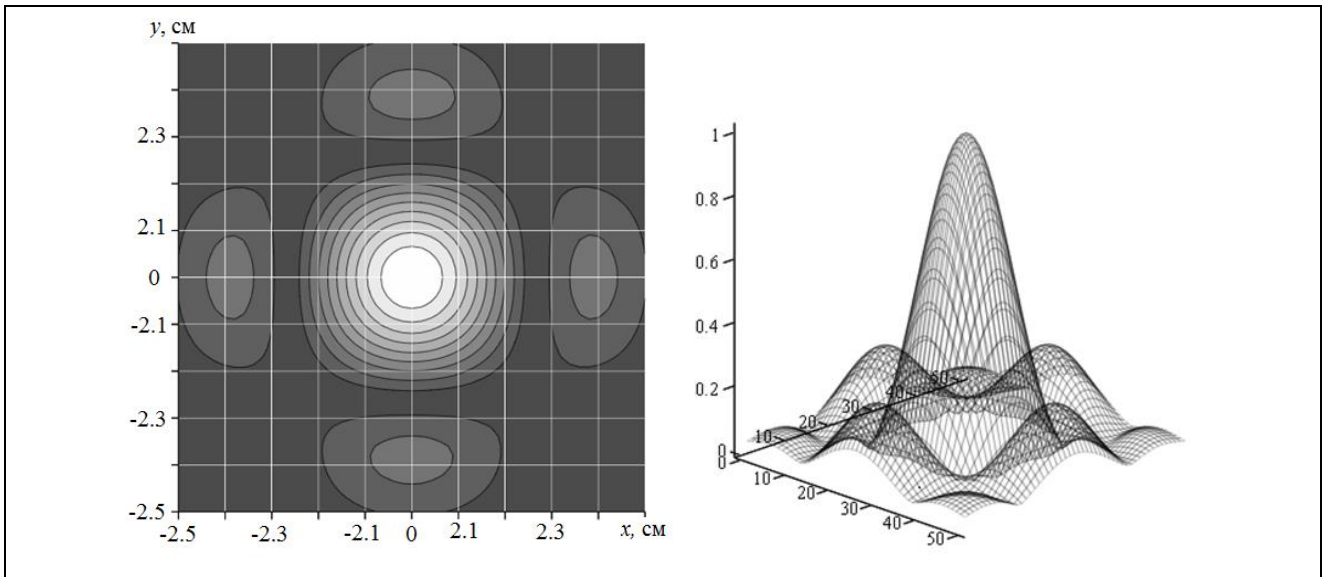


Рис. 2. Топографическая и объемная диаграммы двумерного сечения ОФН в квадратной области плоскости (x, y) размером $5 \times 5 \text{ см}^2$ в отсутствие рециркуляции при ЛЧМ компонентах ЗС.

Точечный объект при вычислении двумерного сечения ОФН располагался на расстоянии $z_0 = 1 \text{ м}$ от плоскости (x, y) и имел вектор координат $\vec{R} = \|0, 0, z_0\|^T$. Сечения ОФН в отсутствие рециркуляции показаны на рис. 2 в области $\Delta X \times \Delta Y = 5 \times 5 \text{ см}^2$ плоскости (x, y) в виде топографической и

объемной диаграмм для ЛЧМ сигнальных компонент (2). Цифры по осям x и y для объемной диаграммы – суть номера рассчитанного массива значений ОФН.

Из анализа сечений ОФН на рис. 2 следует, что разрешение по координатам (x, y) по уровню 0.7 от максимума ОФН составляет $\Delta L \approx 4.1$ см, если отсутствует рециркуляция зондирующих сигналов в системе.

При тех же условиях и наличии рециркуляции с коэффициентами обратной связи $\gamma = 0.7$ и $\gamma = 0.9$ сечения ОФН в топографической и объемной форме показаны на рис. 3 а, б.

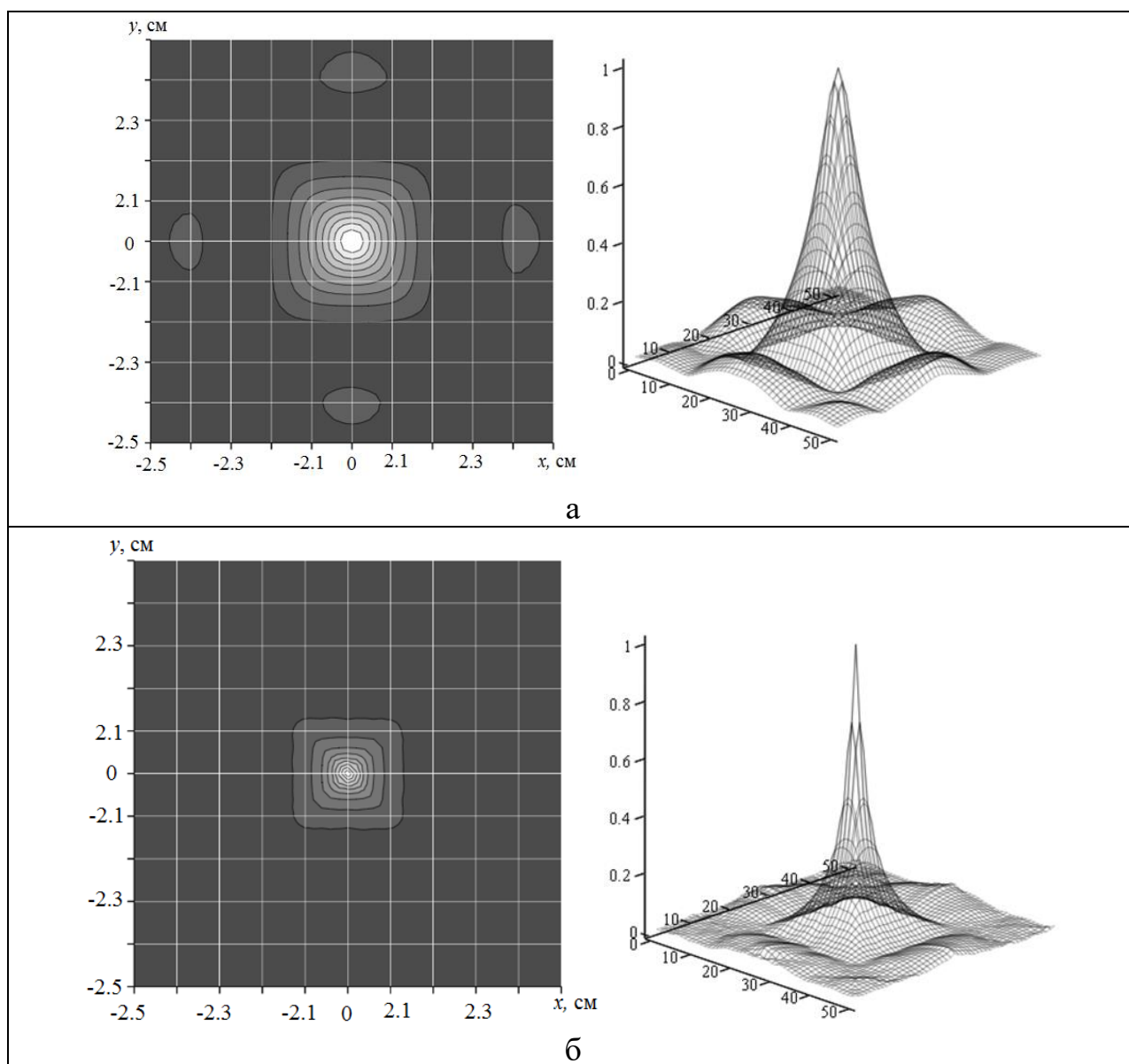


Рис. 3. Топографические и объемные диаграммы двумерных сечений ОФН в условиях рис. 2, но при наличии рециркуляции с $\gamma = 0.7$ (а) и $\gamma = 0.9$ (б).

Разрешение ΔL по координатам (x,y) улучшается по мере увеличения коэффициента передачи по замкнутому кольцу в системе с рециркуляцией зондирующих сигналов (рис.3а,б) от значения $\Delta L \approx 2.1$ см при $\gamma = 0.7$ до $\Delta L \approx 1.0$ см при $\gamma = 0.9$. Сравнение двумерных сечений ОФН на рис.2 и рис.3 а,б показывает, что разрешение в плоскости (x,y) становится в несколько раз выше за счет рециркуляции зондирующих сигналов в системе.

Топографические диаграммы двумерных сечений в «дальностной» плоскости (x,z) для квадратной области $\Delta Z \times \Delta X = 10 \times 10$ см² и симметричные относительно точки $(0,0,z_0)$ при прочих тех же условиях, что и принятые на рис. 2 и 3, показаны на рис.4 а, б соответственно в отсутствие и при наличии рециркуляции со значением $\gamma = 0.9$.

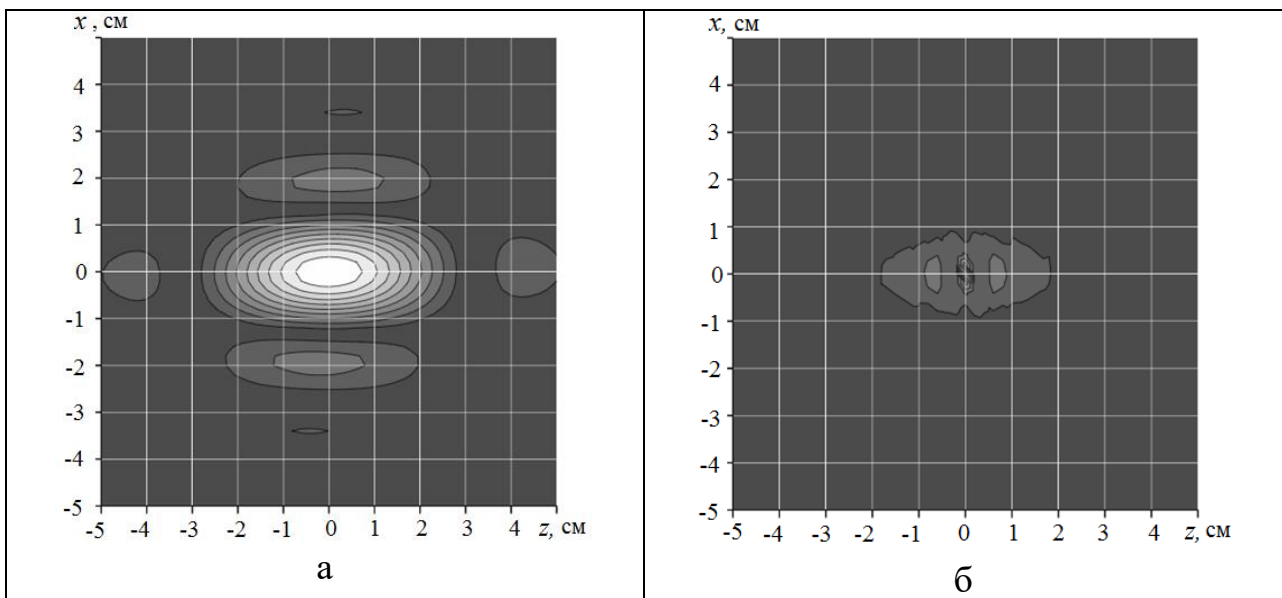


Рис. 4. Топографические диаграммы двумерного сечения ОФН в квадратной области плоскости (z,x) размером 10×10 см² в отсутствие (а) и наличии (б) рециркуляции со значением $\gamma = 0.9$ при ЛЧМ компонентах ЗС.

Анализ двумерных сечений ОФН на рис.4 а, б указывает на повышение более чем в десять раз пространственного разрешения по дальности (координате z или задержке распространения) в плоскости (x,z) за счет рециркуляции зондирующих сигналов в системе радиоголографии.

Проводились также расчеты сечений ОФН для случая моноимпульсного многочастотного (ММЧ) зондирующего сигнала. При этом в отсутствие рециркуляции были получены сечения, практически совпадающие с топографическими диаграммами на рис. 2 и рис. 4а. При наличии рециркуляции с коэффициентом $\gamma = 0.9$ рассчитанные топографические диаграммы представлены на рис. 5 а и 5 б в квадратных областях $\Delta X \times \Delta Y = 5 \times 5 \text{ см}^2$ и $\Delta Z \times \Delta X = 5 \times 5 \text{ см}^2$ соответственно.

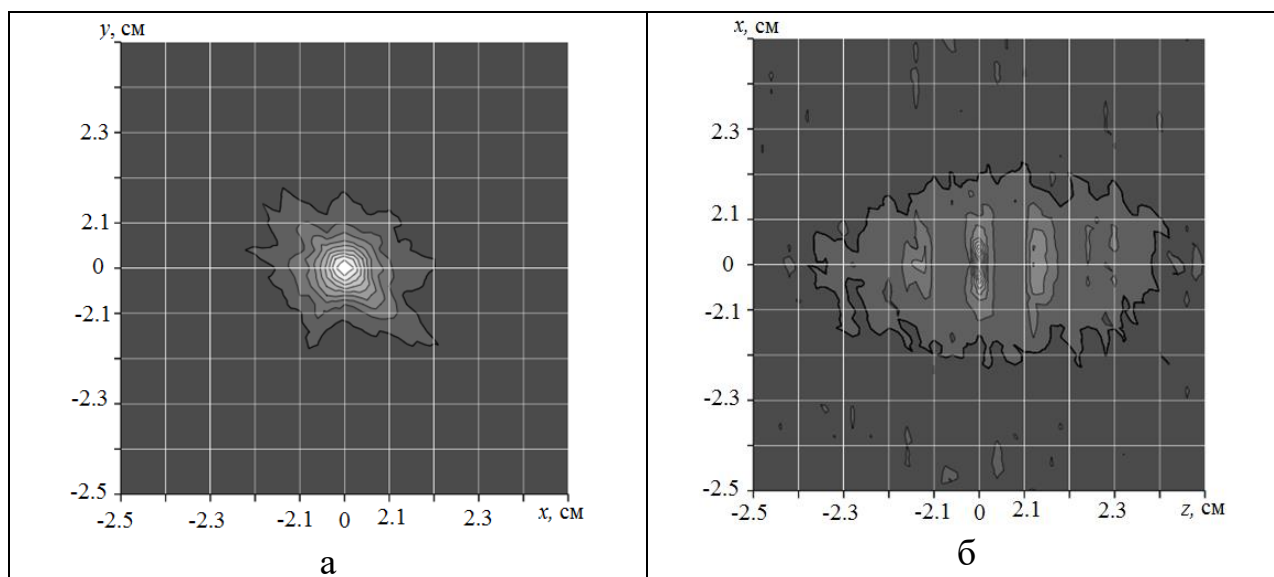


Рис. 5. Топографические диаграммы двумерных сечений ОФН при ММЧ ЗС в квадратных областях размером $5 \times 5 \text{ см}^2$ плоскостей а) (x, y) и б) (z, x) .

Сравнение топографических диаграмм сечений ОФН при ММЧ компонентах зондирующего сигнала (рис. 5) с диаграммами тех же сечений при ЛЧМ компонентах (рис. 3б и рис. 4б) свидетельствует о некотором ухудшении разрешения в плоскости (x, y) и увеличении боковых лепестков в «дальностной» плоскости (z, x) при ММЧ зондирующем сигнале. Объяснением этому является дискретный спектр ММЧ сигнала, не свободный от дифракционных проявлений, в отличие от сплошного спектра при ЛЧМ компонентах с большой частотно-временной базой.

Заключение

Предложен принцип мультистатической радиоголографии (МРГ) с передающей и приемной АР и рециркуляцией сигналов в замкнутых кольцах распространения «передающий элемент - точка наблюдения – приемный элемент – передающий элемент». Получены формулы для обобщенных корреляционных интегралов и функций неопределенности для систем МРГ с рециркуляцией при излучении передающими элементами АР регулярных ортогональных сигнальных компонент вида ЛЧМ или моноимпульсных многочастотных (ММЧ) сигналов.

Сравнение двумерных сечений обобщенных функций неопределенности (ОФН), проведенное на конкретных примерах систем МРГ при наличии и отсутствии рециркуляции показало следующее. Рециркуляция приводит к существенному, в разы и даже на порядок, сужению ширины главного лепестка ОФН, что эквивалентно улучшению во столько же раз пространственного разрешения по малоразмерному (точечному) объекту при соответствующем увеличении коэффициента обратной связи в пространственном кольце рециркуляции до значений 0.7...0.9. Наряду с улучшением пространственного разрешения по точечному объекту наблюдается резкое снижение уровня боковых лепестков ОФН.

Численное моделирование в рассмотренных примерах показывает, что применение ЛЧМ сигнальных компонент имеет определенные преимущества по ширине главного лепестка и уровню боковых лепестков по сравнению с ММЧ компонентами. Данный результат обусловлен дискретностью спектра ММЧ зондирующего сигнала, не свободного от дифракционных проявлений, в отличие от сплошного спектра при ЛЧМ компонентах с большой частотно-временной базой, для которых происходит сглаживание дифракционных эффектов.

Вопрос применимости метода рециркуляции в МРГ для случая многоточечных объектов потребует дальнейшего изучения как в части

получения их радио изображений, так и в части распознавания многоточечных примитивов из заданной конечной совокупности.

Литература

1. E. D. Sharp, M. A. Diab, Van Atta, Reflector Array // IRE Transactions on Antennas and Propagation, 1960, №4, July, pp.436-438.
2. Pon C. Y., Retrodirective Array Using the Heterodyne Technique // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1964, №2, March, pp.176-180.
3. Морская радиолокация, Под ред. В.И. Винокурова, Л., Судостроение, 1986, с. 196-200.
4. Залогин Н.Н., Калинин В.И., Кислов В.Я., Мясин Е.А. и др. Авторское свидетельство №792183, Бюлл. изобретений, № 48, 1980.
5. Калинин В.И., Кислов В.Я., Мясин Е.А. и др. Авторское свидетельство № 820430, Бюлл. изобретений, № 6, 1983.
6. Калинкевич А.А., Крылова М.С., Турыгин М.С., Предварительное теоретическое рассмотрение процессов в шумовой радиолокации с пространственной обратной связью, Сборник докладов Всероссийской научной конференции «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике», Муром, 1 – 3 июля 2003, Муром, 2003, с. 415 – 419.
7. Shalab Gupta, T.R. Brown, Noise-Correlating Radar Based on Retrodirective Antennas // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, v.43, №2, April, pp.472-479.
8. Калинин В.И., Чапурский В.В., Сверхширокополосная шумовая радиолокация на основе антенных решеток с рециркуляцией сигналов // Радиотехника и электроника, т. 53, №. 10, 2008, с. 1266-1277.
9. V. Fusco, N. Buchanan, Developments in retrodirective array technology // IET Microw. Antennas Propag., 2013, Vol. 7, Iss. 2, pp. 131–140.
10. N.B. Buchanan, V. Fusco, Angle of Arrival Detection using Retrodirective RADAR, Proceedings of the 7th European Radar Conference, 30 September - 1 October 2010, Paris, France, pp 133-136.
11. P. Hallbjörner, S. Cheng, Improvement in 77-GHz Radar Cross Section Road Work Jacket and Side Screen by Use of Planar Flexible Retrodirective Reflectors // IEEE antennas and wireless propagation letters, vol. 12, 2013, pp 1085-1088.
12. Tianpeng Liu, Xizhang Wei, Lei Li, Multiple-element retrodirective cross-eye jamming against amplitude-comparison monopulse radar, ICSP2014, Proceedings, pp. 2135-2140.

13. Чапурский В.В., Получение радиоголографических изображений объектов на основе разреженных антенных решеток типа ММО с одночастотным и многочастотным излучением, Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. Приборостроение, 2011, №4, с. 72-91.
14. Чапурский В.В., Избранные задачи теории сверхширокополосных радиолокационных систем, М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.
15. И.В. Крючков, В.В. Чапурский, Аналитическая аппроксимация обобщенной функции неопределенности системы радиолокационного синтезирования апертуры типа ММО // Радиотехника и электроника, т. 62, №11, 2017, с. 1133-1141.

Для цитирования:

В.И.Калинин, В.В.Чапурский. Обобщенная функция неопределенности в мультистатической радиоголографии с рециркуляцией сигналов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr18/9/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.4.9