

В. В. Чапурский

## СИНТЕЗИРОВАНИЕ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ТИПА МИМО

*Теоретически проанализировано восстановление радиоизображения трехмерного объекта в виде совокупности точечных отражателей на основе фокусировки мультистатических радиоголограмм, получаемых при сканировании линейной приемо-передающей разреженной антенной решеткой типа МИМО. Проведено сопоставление разрешающей способности по трем координатам для многочастотных радиоголограмм в сантиметровом и миллиметровом диапазонах: 10...16 и 30...36 ГГц.*

**E-mail:** vchapursky@rslab.ru

**Ключевые слова:** синтезирование, радиоизображение, радиоголография, мультистатический, МИМО антенна.

Развитию теории и практики систем получения радиоизображений (РИ) скрытых объектов в последние годы посвящено большое число зарубежных и отечественных публикаций, в которых описывается применение радиоголографических методов [1, 2]. Для получения высокого качества РИ объектов, скрытых под одеждой человека, традиционно используют частоты, близкие к миллиметровому диапазону волн [2]. В работе [2] применялась антенная система (АС) с механическим сканированием по вертикальной координате на интервале 2,0 м с помощью заполненной линейной антенной решетки (АР) размером 0,73 м, работающей в диапазоне частот 27...33 ГГц, с общим числом приемных и передающих элементов 128. Получение традиционных радиоголограмм (РГ), гарантирующих высокое разрешение РИ, без применения механического сканирования может быть основано на неподвижной заполненной двумерной АР и сопряжено с катастрофически большим числом приемных и передающих элементов. Это не позволяет реализовать подобную радиоголографическую систему с приемлемыми технико-экономическими показателями. В то же время имеются публикации [3, 4], в которых теоретически анализируется метод мультистатической радиоголографии (МРГ). Для этого метода число элементов неподвижной двумерной приемо-передающей разреженной АС, состоящей из разреженных передающей и приемной двумерных АР, элементы которых работают по принципу МИМО (Multiple Input — Multiple Output) [3], сопоставимо с общим числом элементов линейной АС с механическим сканирова-

нием [2]. В работах [3, 4] показано, что при двумерной разреженной АС возможен переход в сантиметровый диапазон волн, в котором имеет место меньшее затухание радиоволн в одежде человека. Кроме того, реализация систем досмотра в сантиметровом диапазоне более выгодна по технико-экономическим показателям. Теоретически разрешающая способность РИ методом МРГ получается не хуже, а в ряде случаев и лучше, чем на основе классической радиоголографии на основе сканирующей заполненной АС [2].

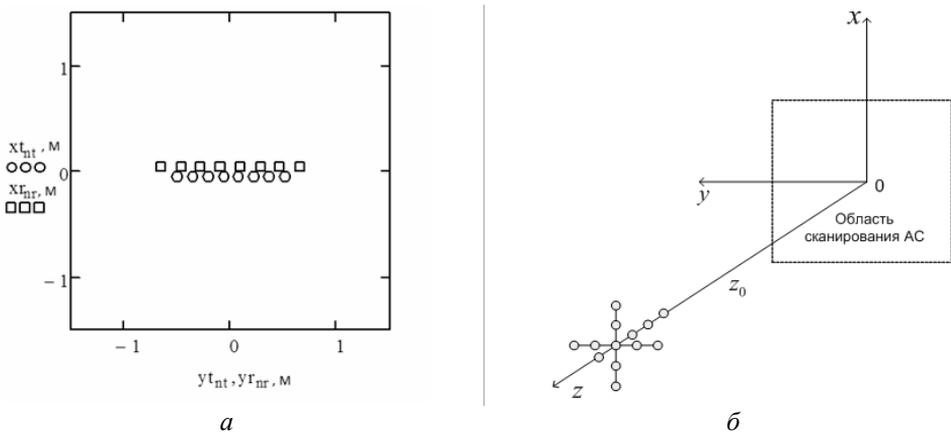
При анализе путей использования метода МРГ и возможного упрощения аппаратуры систем получения РИ скрытых объектов представляет интерес распространение принципов МРГ на систему с механическим сканированием линейной разреженной ММО АС, не исследовавшуюся до настоящего времени и позволяющую получить дальнейшее существенное сокращение числа антенных элементов. Такое сокращение может иметь место как при механически сканирующей *заполненной линейной* АР [2], так и при неподвижной *разреженной двумерной* ММО АС [3, 4].

В связи с изложенным *задачами данной работы* являлись: исследование построения РИ трехмерных объектов в радиоголографической системе на основе синтеза МРГ путем механического сканирования разреженной линейной приемо-передающей ММО АС с малым числом элементов; сопоставление разрешающей способности РИ по трем координатам в такой системе для сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн.

**Синтезирование радиоголограмм и фокусировка изображения объекта при механическом сканировании ММО антенной системы.** При математическом описании фокусировки РИ пространственно-протяженного объекта предположим, что он аппроксимирован совокупностью  $P+1$  точечных отражателей с интенсивностями  $a_p$  и векторами координат  $\mathbf{r}^{(p)}$ ,  $p=0, 1, \dots, P$ . Для получения МРГ используем разреженную ММО АС, состоящую из линейных передающей и приемной АР (рис. 1, а). Данная АС равномерно сканирует как единое целое по вертикали в плоскости  $(x, y)$ , т. е... по направлению оси  $Ox$ , занимая последовательно  $I+1$  положений,  $i=0, 1, \dots, I$ . Линейные передающая и приемная АР содержат соответственно  $N_t+1$  и  $N_r+1$  элементов с номерами  $n=0, 1, \dots, N_t$  и  $k=0, 1, \dots, N_r$ . В каждом положении АС вектора координат  $\mathbf{r}_{m,i}$ ,  $\mathbf{r}_{rk,i}$  передающих и приемных элементов при постоянном шаге сканирования  $\Delta x$  можно описать следующими векторными соотношениями:

$$\mathbf{r}_{m,i} = \mathbf{r}_m + i \cdot \Delta, \quad \mathbf{r}_{rk,i} = \mathbf{r}_{rk} + i \cdot \Delta, \quad (1)$$

где  $\Delta = \|\Delta x, 0, 0\|^T$ ; а  $\mathbf{r}_{in} = \|x_{in}, y_{in}, 0\|^T$ ;  $\mathbf{r}_{rk} = \|x_{rk}, y_{rk}, 0\|^T$  — вектора начальных координат элементов при  $i = 0$ ,  $\tau$  — символ транспонирования вектор-строки.



**Рис. 1.** Передающая (○) и приемная (□) АР в среднем положении в области сканирования АС (а) и расположение протяженного многоточечного объекта на оси  $Oz$  и относительно области сканирования АС (б)

Пусть передающие элементы АС работают последовательно во времени, излучая в неперекрывающихся временных интервалах пачки многочастотных зондирующих сигналов (ЗС) со ступенчатой частотной модуляцией (СЧМ). Последовательные во времени частотные компоненты имеют постоянный шаг по частоте  $\Delta\omega$ :

$$\omega_m = \omega_0 + m\Delta\omega, \quad m = 0, 1, \dots, M. \quad (2)$$

Излучаемые сигналы являются ортогональными по времени от элемента к элементу и от частоты к частоте, аналогично тому, как это имело место в работах [3, 4]. При этом комплексный корреляционный интеграл  $\dot{Q}(\mathbf{r}_0)$  по пространственным координатам  $\mathbf{r}_0$ , модуль которого  $|\dot{Q}(\mathbf{r}_0)|$  эквивалентен трехмерному РИ объекта, можно получить по методике [3] на основе обработки синтезированной при сканировании комплексной многочастотной МРГ  $\dot{V}_{m,i}(n, k)$ . МРГ  $\dot{V}_{m,i}(n, k)$  отвечает всем положениям АС  $i$ , номерам  $m$  излучаемых частот и парам  $n - k$  передающий — приемный элементы. При этом алгоритм обработки имеет вид

$$\dot{Q}(\mathbf{r}_0) = \sum_{i=0}^I \dot{Q}_i(\mathbf{r}_0), \quad (3)$$

где  $\dot{Q}_i(\mathbf{r}_0)$  — частичный корреляционный интеграл в  $i$ -м положении линейной ММО АС, вычисляемый аналогично полной двумерной АС в работах [3, 4]:

$$\dot{Q}_i(\mathbf{r}_0) = \sum_{n,k=0}^{N_t, N_r} \sum_{m=0}^M w_m \exp\{j\omega_m \tau_{n,k}(\mathbf{r}_0; i)\} \dot{V}_{m,i}(n, k). \quad (4)$$

Здесь  $w_m$  — весовые коэффициенты при суммировании по частотам  $\omega_m$ ,  $\tau_{n,k}(\mathbf{r}; i)$  — бистатистическая задержка сигнала для пары « $n$ -й передающий элемент — точка пространства с вектором координат  $\mathbf{r}$  —  $k$ -й приемный элемент»,

$$\tau_{n,k}(\mathbf{r}; i) = \frac{1}{c} \left[ |\mathbf{r} - \mathbf{r}_{m,i}| + |\mathbf{r} - \mathbf{r}_{rk,i}| \right], \quad (5)$$

$c$  — скорость света;  $|\mathbf{a}|$  — модуль вектора  $\mathbf{a}$ .

Для введенной ранее модели пространственно протяженного многоточечного объекта многочастотная МРГ  $\dot{V}_{m,i}(n, k)$  в  $i$ -м положении ММО АС может быть записана в следующем виде:

$$\dot{V}_{m,i}(n, k) = \sum_{p=0}^P a_p \exp\left\{ -j\omega_m \tau_{n,k}(\mathbf{r}^{(p)}; i) \right\}, \quad m = 0, 1, \dots, M. \quad (6)$$

Подстановка (6) в (4) позволяет в аналитической форме выполнить суммирование по частотам и записать обобщенный комплексный корреляционный интеграл (3) следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{Q}(\mathbf{r}_0) = \\ = \sum_{n,k,i=0}^{N_t, N_r, I} \sum_{p=0}^P a_p \exp\left\{ j(\omega_0 + M \Delta\omega/2) \Delta\tau_{n,k}(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}^{(p)}; i) \right\} W\left( \Delta\omega \cdot \Delta\tau_{n,k}(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}^{(p)}; i) \right), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\Delta\tau_{n,k}(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}; i) = \tau_{n,k}(\mathbf{r}_0; i) - \tau_{n,k}(\mathbf{r}; i)$ , а  $W(x)$  — дискретное преобразование Фурье функции окна  $w_m$ . Для обобщенного окна Хэмминга  $W(x)$  имеет аналитическую форму [3].

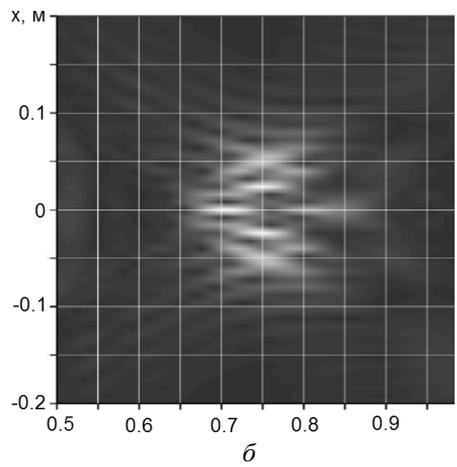
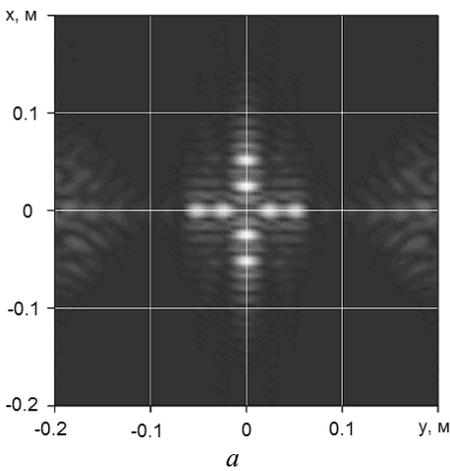
Вычисляя  $|\dot{Q}(\mathbf{r}_0)|$ , получаем РИ методом многочастотной синтезированной МРГ при механическом сканировании. При  $M = 0$  многочастотная МРГ сводится к случаю одночастотной. Общие результаты справедливы и для одноточечного объекта при  $P = 0$ . Получаемое

при этом РИ совпадает с обобщенной функцией неопределенности системы по пространственным координатам, используемой в ММО радиолокации [5].

**Результаты моделирования радиоизображений трехмерного объекта.** Для моделирования фокусировки синтезированных МРГ при сканировании ММО АС и приемлемом качестве РИ было выбрано минимальное и одинаковое число элементов передающей и приемной линейных АР,  $N_t + 1 = N_r + 1 = 8$ . Постоянный шаг элементов этих АР выбирался не кратным и равнялся соответственно  $\Delta u_t = 0,143$  м и  $\Delta u_r = 0,186$  м, так что линейные размеры АР составляли  $L_t = 1,0$  м и  $L_r = 1,3$  м. В среднем положении АС показана на рис. 1, а. Расстояние между АР по оси  $Ox$  составляло 9 см, а положение объекта относительно области сканирования приведено на рис. 1, б. Шаг сканирования и число положений АС равны  $\Delta x = 1,0$  см и  $I + 1 = 131$  (или  $\Delta x = 2,0$  см и  $I + 1 = 65$ ) при размере области сканирования по оси  $Ox$ , равном 1,3 м.

Фокусировка РИ проводилась при неизменных размерах и числе элементов АС в сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн для следующих случаев: 1) одночастотная МРГ при  $f_0 = 10$  ГГц или  $f_0 = 30$  ГГц и 2) многочастотная МРГ на шести частотах, распределенных с постоянным шагом в двух частотных диапазонах: *сантиметровом* с частотами от  $f_0 = 10$  ГГц до  $f_0 + \Delta F = 16$  ГГц и *миллиметровом* с частотами от  $f_0 = 30$  ГГц до  $f_0 + \Delta F = 36$  ГГц (или 38 ГГц). Пространственно-распределенный точечный объект находился на удалениях  $z_0 = 0,75$  м, и  $z_0 = 1,5$  м по оси  $Oz$  от плоскости сканирования  $xOy$  и состоял из 13 точечных отражателей с расстояниями между соседними отражателями 2,5 см. Конфигурация и положение объекта показаны на рис. 1, б (для наглядности объект значительно увеличен по отношению к области сканирования). Результаты фокусировки *одночастотной* синтезированной МРГ в *сантиметровом диапазоне* представлены на рис. 2, а в картинной плоскости  $(x, y, z_0)$ , параллельной плоскости сканирования, и на рис. 2, б — в вертикальной плоскости  $(x, 0, z)$  (координаты по осям отложены в метрах).

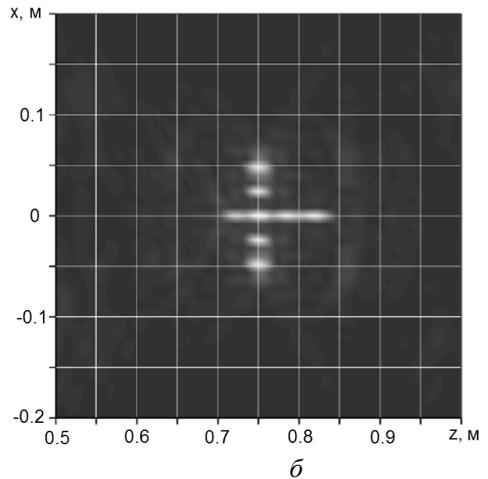
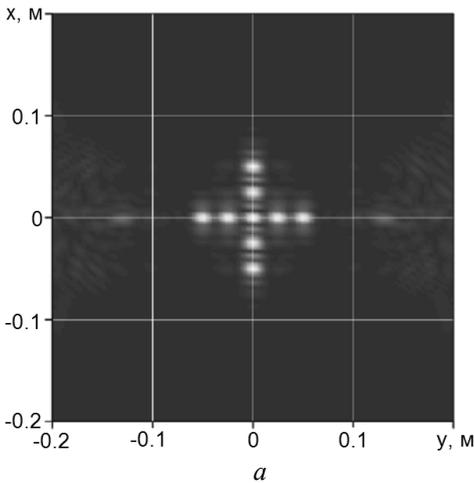
На рисунке видно среднее качество РИ в картинной плоскости и практическое отсутствие фокусировки в плоскости  $(x, 0, z)$ , что является следствием низкого разрешения по оси  $Oz$  при одночастотной МРГ.



**Рис. 2.** Сфокусированные РИ по одночастотной синтезированной МРГ при  $z_0 = 0,75$  м в сантиметровом диапазоне на частоте 10 ГГц:

$a$  — в картинной плоскости  $(x, y, z_0)$ ;  $b$  — в вертикальной плоскости  $(x, 0, z)$

Результаты фокусировки многочастотной синтезированной МРГ в сантиметровом диапазоне при полосе частот 10...16 ГГц в тех же плоскостях приведены на рис. 3.



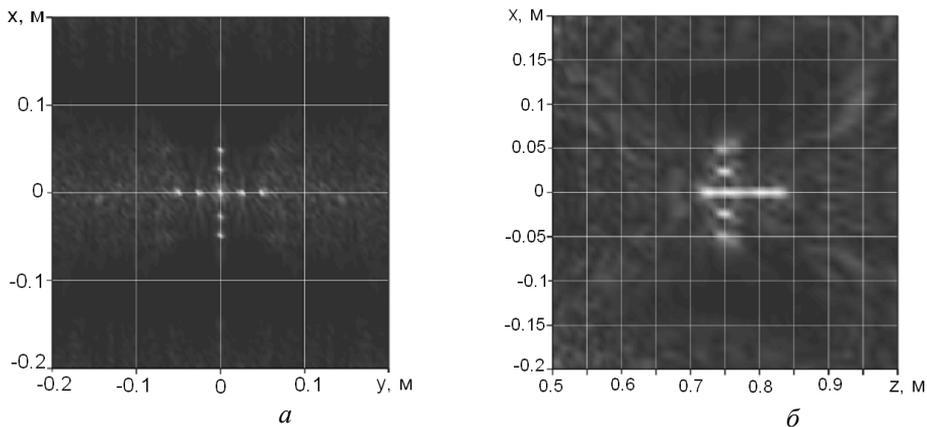
**Рис. 3.** Сфокусированные РИ по многочастотной синтезированной МРГ при  $z_0 = 0,75$  м в сантиметровом диапазоне в полосе частот 10...16 ГГц:

$a$  — в картинной плоскости  $(x, y, z_0)$ ;  $b$  — в вертикальной плоскости  $(x, 0, z)$

На рисунке видно значительное улучшение РИ в картинной плоскости — появилось изображение центральной точки «креста», пропадавшее на рис. 2,  $a$  вследствие интерференции с неразрешенными по оси  $Oz$  точечными отражателями, и уменьшился уровень боковых ле-

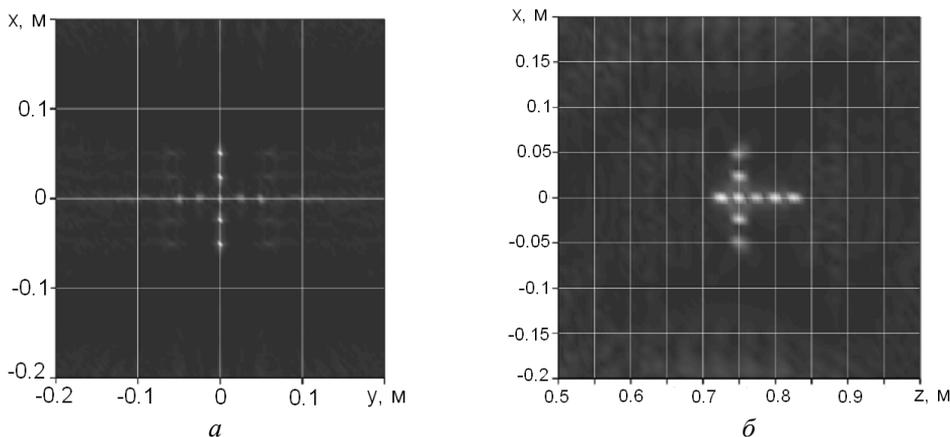
пестков. Также вполне качественно сфокусировано РИ в плоскости  $(x, 0, z)$ , что теоретически свидетельствует о возможности восстановления РИ трехмерных объектов в сантиметровом диапазоне волн. Разрешения по оси  $Oz$  несколько недостаточно, что объясняется теоретическим значением разрешающей способности  $\delta z = c/(2\Delta F)$ , при  $\Delta F = 6,0$  ГГц составляющего  $\delta z = 2,5$  см, что совпадает с расстояниями между элементарными точечными отражателями данной модели объекта.

Аналогичные результаты, полученные для миллиметрового диапазона 30...36 ГГц, представлены на рис. 4 и 5.



**Рис. 4. Сфокусированные РИ по одночастотной синтезированной МРГ при  $z_0 = 0,75$  м на частоте 30 ГГц:**

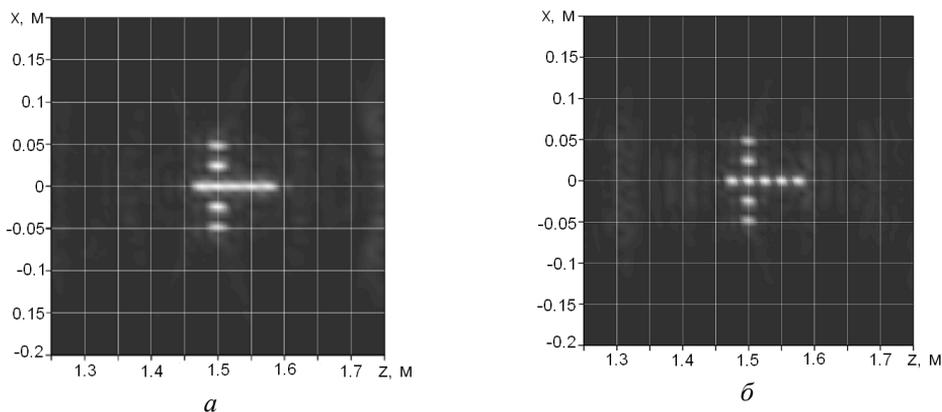
$a$  — в картинной плоскости  $(x, y, z_0)$ ;  $b$  — в вертикальной плоскости  $(x, 0, z)$



**Рис. 5. Сфокусированные РИ по многочастотной синтезированной МРГ при  $z_0 = 0,75$  м в миллиметровом диапазоне в полосе частот 30...36 ГГц:**

$a$  — в картинной плоскости  $(x, y, z_0)$ ;  $b$  — в вертикальной плоскости  $(x, 0, z)$

На рисунках видно, что разрешающая способность РИ улучшилась, что обусловлено существенным уменьшением длины волны при прежнем, достаточно малом расстоянии. Появление разрешения элементарных отражателей по дальности при многочастотном сигнале и той же ширине полосы частот, что и в сантиметровом диапазоне волн, изображенном на рис. 3, б, объясняется уменьшением длины волны и влиянием сферичности фронта волн в зоне Френеля в большей степени, чем при той же полосе частот в сантиметровом диапазоне. Характерно, что с увеличением расстояния до объекта до 1,5 м в диапазоне частот 30...36 ГГц разрешение по дальностной координате  $z$  ухудшается и становится адекватным полосе частот многочастотного сигнала (рис. 6, а).



**Рис. 6.** РИ многоточечного объекта в вертикальной плоскости  $(x, 0, z)$  при  $z_0 = 1,5$ , м сфокусированные по *многочастотной* синтезированной МРГ в миллиметровом диапазоне волн при полосе частот 30...36 ГГц (а) и 30...38 ГГц (б)

Данный факт объясняется увеличением диаметра зон Френеля с увеличением расстояния и приближением формы фронта волны в области объекта к плоскому. Для исключения этого достаточно некоторого увеличения полосы частот, так, например полосы 30...38 ГГц достаточно, чтобы восстановить разрешение по дальности (рис. 6, б).

Анализ алгоритмов и примеры фокусировки РИ по многочастотной МРГ, синтезированной при механическом сканировании ММО АС, показали, что метод МРГ на основе синхронно сканирующих линейных передающей и приемной разреженных АР позволяет теоретически получить РИ трехмерных объектов с высоким разрешением по трем координатам (в плоскости сканирования и по дальности) при весьма малом числе элементов ММО АС и в сантиметровом и в миллиметровом диапазонах волн. Сравнение с известными результа-

тами механического сканирования методом классической РГ [2] показывает возможность уменьшения суммарного числа передающих и приемных элементов порядка 8 раз. По сравнению с вариантом получения МРГ на основе двумерной приемо-передающей неподвижной АР [3, 4] сокращение числа элементов при практически одинаковом качестве РИ также составляет не менее 8 раз. Естественно, что при одинаковых размерах и числе элементов АС разрешающая способность РИ по всем трем координатам при наблюдении трехмерного объекта в миллиметровом диапазоне волн достигается в большем интервале дальностей, чем в сантиметровом диапазоне.

*Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 10-07-00490-а.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Microwave Hologram Reconstruction For The RASCAN Type Subsurface Radar / V.V. Chapursky, S.I. Ivashov, V.V. Razevig et al. // Proceedings of SPIE. – Vol. 4758. P. 520–526.
2. Sheen D. M., McMakin D. L., Hall T. E. Three-Dimensional Millimeter-Wave Imaging for Concealed Weapon Detection // IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques. – 2001. – Vol. 49. – No. 9. – P. 1581–1592.
3. 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.
4. Чапурский В. В. Сравнительные аспекты фокусировки классических и мультистатических дискретных радиоголограмм // Тр. V Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь», 21–25 ноября 2011 г. – С. 100–104.
5. MIMO Radar: An Idea whose Time has come / E. Fishler, A. Haimovich, R. Blum et al. // Proceedings of the IEEE Radar Conference. 26–29 April. 2004. – P. 71–78.

Статья поступила в редакцию 17.09.2012