

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

УДК 621.396

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ
РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ
МЕТОДОМ ОДНОМЕРНЫХ РАДИОГОЛОГРАММ

© 2019 г. В. А. Голунов¹, *, В. А. Коротков¹, К. В. Коротков¹

¹Фрязинский филиал Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Российская Федерация, 141190 Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

*E-mail: golsnow@mail.ru

Поступила в редакцию 22.05.2017 г.

После доработки 26.02.2018 г.

Принята к публикации 26.03.2018 г.

В целях повышения оперативности получения изображений объектов предложен метод одномерных радиоголограмм. Существенная особенность метода – наклонное зондирование объектной плоскости. Возможности метода исследуются с помощью компьютерного моделирования. Показано, что при зондировании точечных и плоских объектов на десяти частотах в интервале 29.5...30.5 ГГц удовлетворительное качество восстановленных изображений достигается при регистрации двух ортогональных одномерных голограмм.

DOI: 10.1134/S0033849419010066

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время интенсивно развивается радиовидение, одним из направлений которого является радиоголография. Многочисленные исследования показали возможности широкого применения радиоголографических систем: например, в сфере безопасности [1, 2], для бесконтактного контроля строительных конструкций [3–5], в медицине [6, 7].

Радиоголограммы, рассмотренные в данной работе, отличаются по своим свойствам от обычных оптических голограмм. Это отличие обусловлено не столько диапазоном длин волн, сколько способом формирования радиоголограмм, при котором в каждой ее точке становятся известными амплитуда и фаза принятого поля. В оптическом случае обычно фиксируется результат интерференции опорной и рассеянной объектом волн.

Радиоголограммы можно условно разделить на моностатические (облучение и прием рассеянного объектом излучения осуществляются одной антенной) и бистатические (облучающая и приемная антенны пространственно разнесены), одночастотные и многочастотные. Традиционно под радиоголограммой понимают 2D-голограмму, т.е. двумерный массив комплексных значений поля, измеренных в точках внутри ограниченной, как правило, прямоугольной, плоской области, что позволяет восстановить трехмерное изображение объектов в пространстве [4, 8–12].

Регистрация 2D-радиоголограмм связана в большинстве случаев со значительными временными и материальными затратами. Снижение этих затрат достигается с помощью антенных решеток ММО [10, 11], априорной информации о местонахождении объекта [13, 14], оптимизации шага регистрации радиоголограммы [15] и за счет движения объекта [16, 17].

Цель данной работы – исследовать с помощью компьютерного моделирования возможности восстановления радиоизображений по радиоголограммам, измеренным только вдоль одного или двух ортогональных отрезков при наклонном зондировании объектной плоскости, чтобы значительно снизить указанные выше затраты. Рассмотрен моностатический случай одно- и многочастотного зондирования.

Голограммы, измеренные вдоль отрезка прямой, будем называть одномерными. Они могут быть получены также с помощью методов бистатической локации и ММО при соответствующем расположении приемников и передатчиков. Вариант регистрации радиоголограммы вдоль отрезка прямой теоретически идентичен известному режиму радиолокационного синтезирования апертуры (РСА) [18]. Однако для обеспечения высокой разрешающей способности по дальности в РСА вместо непрерывного зондирующего сигнала используют импульсные сигналы или сигналы с внутриимпульсной модуляцией (частотной или фазовой) [18].

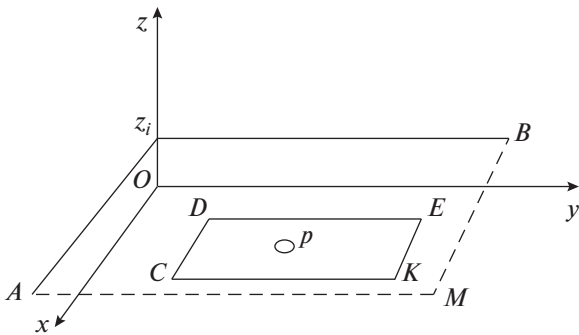


Рис. 1. Схема регистрации одномерных голограмм вдоль отрезков Az_i и z_iB при наклонном зондировании объектной плоскости $CDEK$.

1. ИСХОДНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Пусть плоскость моностатической голограммы Az_iBM (рис. 1) расположена параллельно объектной плоскости XOY на высоте z_i , а на объектной плоскости расположены одиночный точечный рассеиватель p или совокупность точечных рассеивателей в пределах прямоугольника $CDEK$. Регистрация одномерных голограмм осуществляется либо только вдоль одного отрезка Az_i , либо вдоль двух отрезков Az_i и Bz_i .

В рассматриваемом случае поле, отраженное рассеивателями $p(x_j, y_j, z_j)$, можно вычислить в точке с координатами $\{x_i, y_i, z_i\}$ при $|\vec{r}_i - \vec{r}_j| > \lambda$ следующим образом [4, 8, 9]:

$$E(\vec{r}_i, f) = \frac{1}{i\lambda} \sum_j S_j \exp[ik2|\vec{r}_i - \vec{r}_j|/|r_i - r_j|^2], \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$, $\lambda = c/f$ – длина волны, f – частота, S_j – коэффициент отражения j -го рассеивателя, \vec{r}_j – координаты j -го рассеивателя, $|\vec{r}_i - \vec{r}_j|$ – расстояние от рассеивателя до точки приема.

Измеренное поле (т.е. голограмма) $E(\vec{r}_i, f)$ позволяет оценить распределение рассеивателей $p(x_j, y_j, z_j)$ с помощью корреляционного интеграла [8, 10, 11]:

$$Q(\vec{r}_j, f) = \sum_i E^*(\vec{r}_i, f) \exp[ik2|\vec{r}_i - \vec{r}_j|]|\vec{r}_i - \vec{r}_j|^n, \quad (2)$$

где знак (*) обозначает комплексное сопряжение; n – коэффициент, обычно полагаемый равным нулю, но в нашем случае для выравнивания яркости полученного изображения целесообразно использовать $n = 1$.

Далее формулы (1) и (2) используем соответственно для вычисления одномерных голограмм и восстановления изображений заданных объектов. Под восстановленным изображением будем понимать модуль $Q(\vec{r}_j, f)$ [8, 10, 11]. Отметим, что если измерение $E(\vec{r}_i, f)$ выполнить на ряде частот

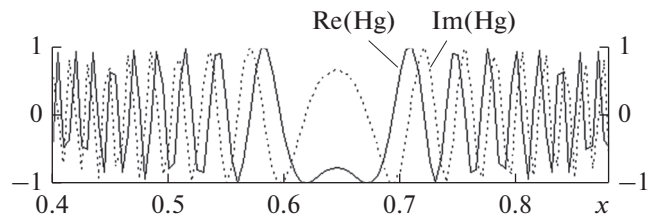


Рис. 2. Центральная часть одномерной голограммы точечного рассеивателя с координатами $x = y = 0.64$ м при $z_i = 0.05$ м, $Az_i = 0 \dots 1.28$ м, $\Delta x = 5 \times 10^{-3}$ м на частоте 30 ГГц: сплошная линия – действительная часть, пунктир – мнимая часть принятого поля.

в интервале $[f_1 \dots f_2]$, то соответствующее частотное усреднение $Q(\vec{r}_j, f)$ позволит оценить усредненное распределение рассеивателей.

2. ПРИМЕРЫ ГОЛОГРАММ И ВОССТАНОВЛЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТОЧЕЧНЫХ РАССЕИВАТЕЛЕЙ

Рассмотрим случай одного точечного рассеивателя. На рис. 2 приведена голограмма на частоте 30 ГГц, рассчитанная на отрезке $Az_i = 0 \dots 1.28$ м с шагом $\Delta x = 5 \times 10^{-3}$ м при $z_i = 0.05$ м для рассеивателя с координатами $x = y = 0.64$ м. Такой размер голограммы примерно соответствует случаю досмотра в аэропортах [16, 17].

Как правило, при измерениях голограмм с помощью механического сканирования задают шаг $\Delta x \leq \lambda/4$. В рассматриваемом случае выбран шаг вдвое больше, чтобы показать возможность восстановления изображений при использовании линеек приемопередающих антенн.

Изображение точечного рассеивателя, восстановленное с помощью (2) по голограмме, приведенной на рис. 2, показано на рис. 3а. Если увеличить количество точечных рассеивателей до пяти штук, то при прежних прочих условиях получим их восстановленное изображение, представленное на рис. 3б. Видно, что изображение группы точечных рассеивателей, восстановленное по одномерной голограмме, достаточно сильно искажено наличием интерференционных артефактов. Кроме того, обнаруживается, что разрешения по осям Ox и Oy существенно отличаются.

На рис. 4 представлены графики зависимости поперечного и продольного разрешения от расстояния до центральной точки отрезка регистрации одномерной голограммы, рассчитанные на основе анализа интерференционной структуры восстановленных изображений. Пунктиром обозначена зависимость поперечного разрешения,

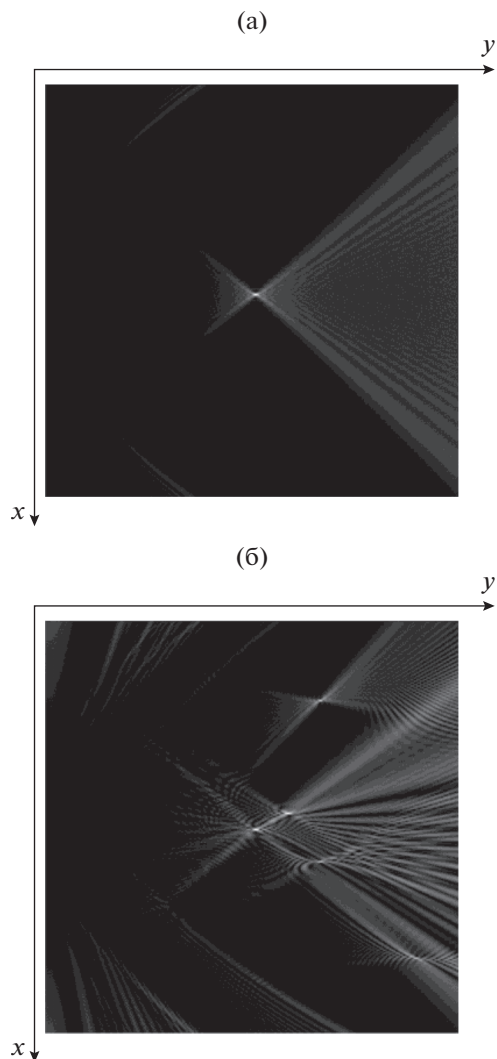


Рис. 3. Восстановленные изображения на частоте 30 ГГц одного точечного рассеивателя (а) и группы из пяти рассеивателей (б).

рассчитанная с помощью классического соотношения:

$$\Delta p_x = \lambda r / D, \quad (3)$$

где D – линейный размер апертуры, который в рассматриваемом случае определяется линейным размером синтезированной апертуры, т.е. равным размеру одномерной голограммы.

Из представленных графиков следует, что продольное разрешение на порядок ниже поперечного. Для того чтобы уравнивать разрешение по обеим осям, используем две ортогональные одномерные голограммы, одна из которых регистрируется параллельно оси Ox , другая – параллельно оси Oy (см. рис. 1). Кроме того, рассмотрим возможность повышения эффективности предлагаемого метода за счет увеличения количества радиочастот.

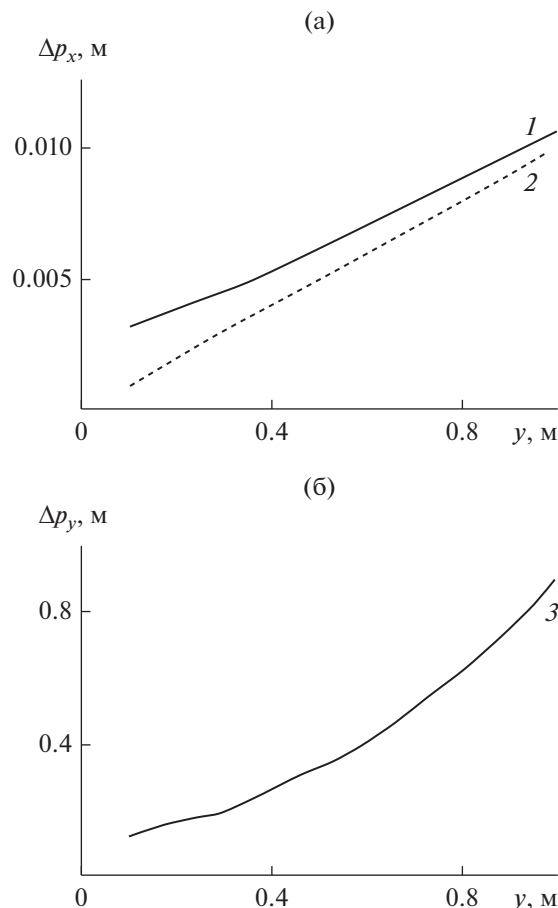


Рис. 4. Зависимости поперечного (а) и продольного (б) разрешения точечного рассеивателя от расстояния до одномерной голограммы: 1, 3 – расчет по интерференционной структуре восстановленных изображений точечных рассеивателей, 2 – расчет по формуле (3).

Изображения, восстановленные по двум ортогональным одномерным голограммам на одной и десяти частотах, показаны на рис. 5. Видно, что использование двух ортогональных одномерных голограмм, измеренных на десяти частотах, позволяют существенно повысить качество восстановленных изображений точечных объектов.

Следует отметить, что использование полосы частот в примере, приведенном на рис. 5, обусловлено подавлением артефактов в виде полос на изображении, а не с целью повышения разрешения, как это делается в случае РСА [18].

3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ ПЛОСКИХ И СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

При значительном увеличении количества точечных рассеивателей качество их восстановленных изображений еще в более значительной

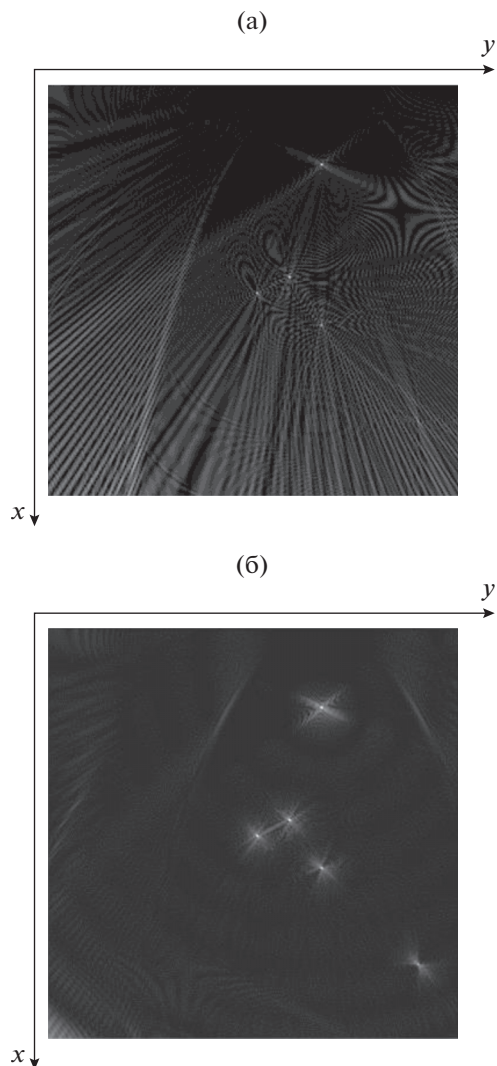


Рис. 5. Изображения, восстановленные с использованием двух одномерных голограмм, зарегистрированных параллельно осям Ox и Oy при $z_i = 0.05$ м, $Az_i = 1.28$ м: (а) $f = 30$ ГГц; (б) десять дискретных частот, распределенных в интервале $f = 29.5 \dots 30.5$ ГГц с шагом 0.11 ГГц.

мере определяется условиями формирования голограмм. Выполненное моделирование показало, что необходимым условием восстановления распознаваемых изображений объектов с помощью одной или двух ортогональных одномерных радиоголограмм является многочастотное зондирование. Так, на рис. 6 показаны изображения плоского объекта, восстановленные по одномерным голограммам, рассчитанным на десяти частотах, при этом на рис. 6а использована одна голограмма, а на рис. 6б — две ортогональные голограммы. Как следует из этих рисунков, в обоих случаях объект распознаваем. Очевидно, что при использовании ортогональных голограмм качество изображения выше, что обусловлено выравниванием линейного разрешения по осям Ox и Oy .

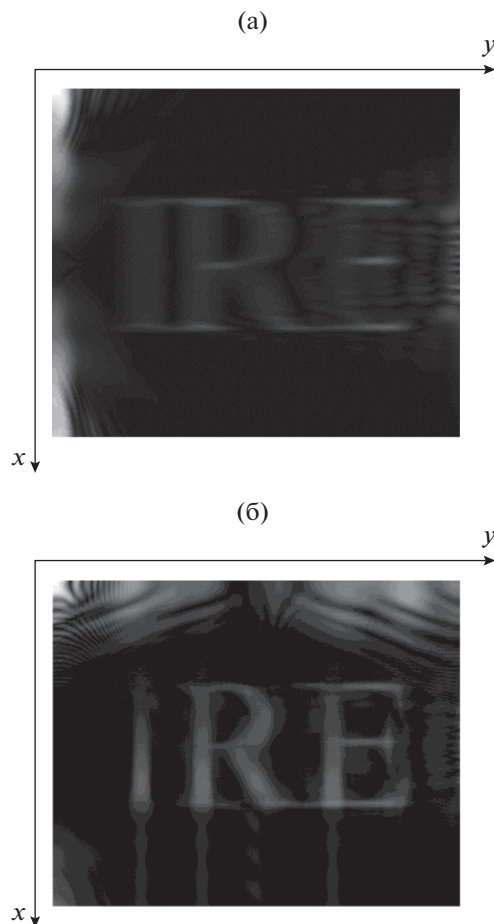


Рис. 6. Изображения, восстановленные по одномерным голограммам, рассчитанным на десяти частотах, равномерно распределенных на интервале $29.5 \dots 30.5$ ГГц: (а) одна одномерная голограмма, рассчитанная вдоль отрезка Az_i ; (б) две ортогональные одномерные голограммы, рассчитанные вдоль отрезков Az_i и Bz_i (см. рис. 1).

Покажем, что использование одномерных голограмм эффективно не только для восстановления изображений плоских объектов.

На рис. 7 представлена схема расположения двух объектов — решетки и надписи. Надпись имеет размеры 1.28×1.28 м. Решетка лежит в плоскости XOY . Надпись находится под решеткой на 0.05 м ниже. Если смотреть сверху, то решетка закрывает только часть надписи. Такое расположение позволяет увидеть влияние верхнего объекта (решетки) на незатененную им часть нижнего объекта.

Изображения, восстановленные по двум одномерным многочастотным голограммам, показаны на рис. 8а, 8б, которые отличаются между собой фокусировкой, т.е. заменой значения расстояния z_i : с 0.05 м до решетки на 0.1 м до надписи.

Для сравнения на рис. 9 и 10 приведены изображения тех же объектов, восстановленные по

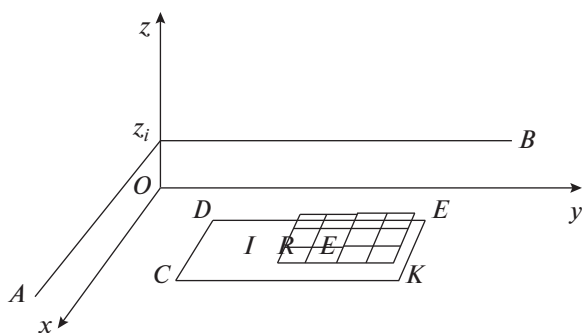


Рис. 7. Схема расположения решетки в плоскости XOY и надписи, находящейся на 0.05 м ниже решетки.

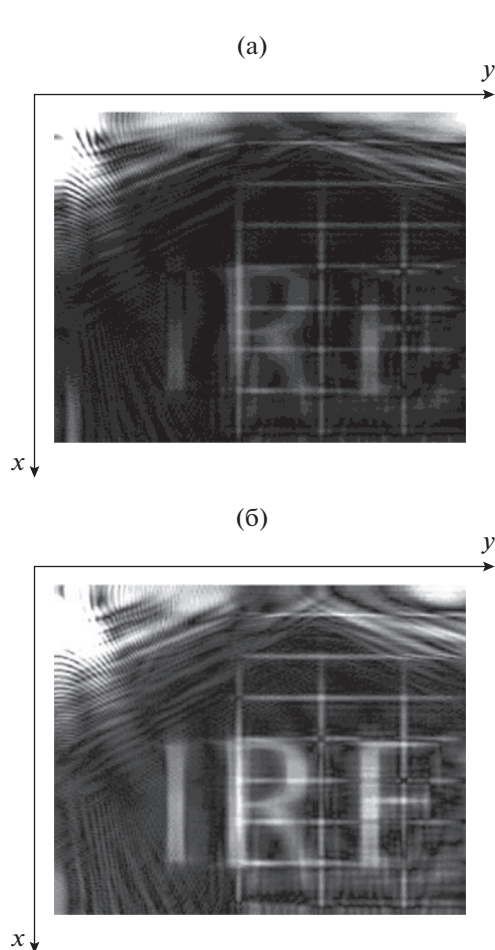


Рис. 8. Изображения, полученные на десяти частотах в полосе 29.5...30.5 ГГц по двум ортогональным одномерным голограммам, вычисленным вдоль отрезков Az_i и Bz_i : (а) фокусировка на решетке, (б) на буквах.

2D-голограммам, рассчитанным соответственно для частоты 30 ГГц и при указанных выше десяти частотах и значениях z_i . При сравнении рис. 8 с рис. 9 и рис. 10 видно, во-первых, что одномерные голограммы позволяют получить распознаваемые изображения двух объектов, разнесенных

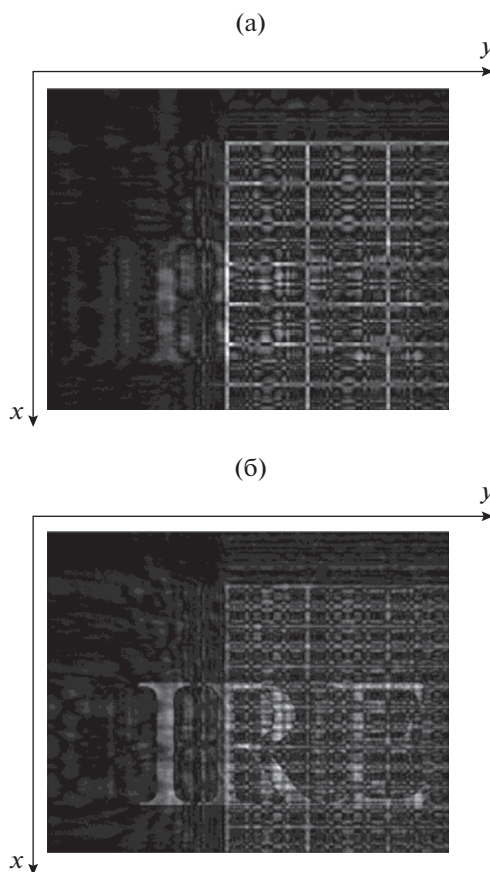


Рис. 9. Изображения, полученные на частоте 30 ГГц по 2D-голограммам: (а) фокусировка на решетке, (б) на буквах.

по дальности; во-вторых, качество этих изображений сравнимо с качеством изображений, восстановленных по одночастотным 2D-голограммам, но ниже качества изображений из многочастотных 2D-голограмм; в-третьих, фокусировка в случае 2D-голограмм более эффективна, чем в случае одномерных голограмм.

Однако при формировании двух ортогональных одномерных голограмм были использованы $2N$ отсчетов, в то время как в случае 2D-голограмм — N^2 отсчетов (N — отношение длины одномерной голограммы к шагу регистрации). Таким образом, получение изображений по двум одномерным голограммам в $N/2$ раз быстрее, чем по 2D-голограммам. Например, для голограммы, приведенной на рис. 1, $N = 256$. Следовательно, интервал времени, необходимый для регистрации двух таких голограмм, более чем в 100 раз меньше, чем в случае регистрации соответствующей 2D-голограммы. При решении задач обнаружения и экспресс-диагностики объектов высокая оперативность получения изображений по одномерным голограммам может иметь определяющее значение.

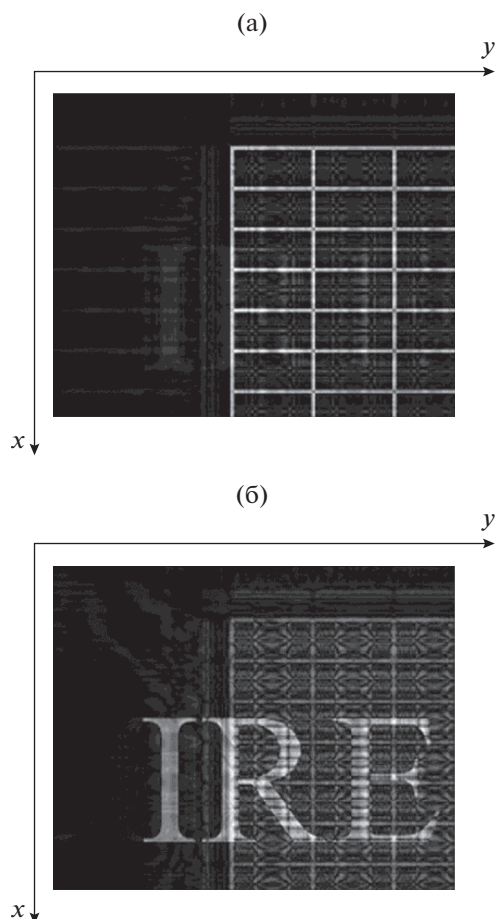


Рис. 10. Изображения, полученные на десяти частотах в полосе 29.5...30.5 ГГц по 2D-голограммам: (а) фокусировка на решетке, (б) на буквах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложен метод радиоголографии, основанный на регистрации одной или двух ортогональных одномерных голограмм при наклонном зондировании плоскости объекта. Особенности восстановления изображений точечных и плоских, в том числе разнесенных по дальности, объектов предложенным методом рассмотрены с помощью компьютерного моделирования на частоте 30 ГГц и на десяти частотах, равномерно распределенных в интервале 29.5...30.5 ГГц.

Показано, что

а) использование одной одномерной голограммы позволяет восстанавливать распознаваемые изображения плоских объектов только при многочастотном зондировании, при этом линейное разрешение по дальности на порядок ниже поперечного;

б) удовлетворительное качество восстановленных изображений достигается при регистрации двух многочастотных ортогональных одномерных голограмм;

в) оперативность получения изображений объектов методом двух одномерных голограмм существенно выше, чем в случае 2D-голограмм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sheen D.M., McMakin L., Hall E. // IEEE Trans. MTT. 2001. V. 49. № 9. P. 1581.
2. Razevig V., Zhuravlev A., Ivashov S. // Processing of SPIE Symposium on Defense and Security, Radar Sensor Technology XVIII Conf. Baltimore, Maryland, USA, 2014. V. 9074. P. 907402-1 (<http://www.rslab.ru/downloads/Paper%201%20from%20SPIE%20Digital%20Library.pdf>).
3. Gunes O., Buyukozturk O. // Intern. J. Phys. Sci. 2012. V. 7. № 3. P. 383.
4. Kim Y.J., Jofre L., De Flaviis F. et al. // 16th ASCE Engineering Mechanics Conf. 16–18 July 2003. University of Washington, Seattle. P. 1. (<http://www.ece.uci.edu/rf-mems/publications/papers/imaging/C081-ACES03.pdf>).
5. Ивашов С.И., Васильев И.А., Журавлев А.В. и др. // Успехи современ. радиоэлектроники. 2009. № 1–2. С. 5.
6. Wang L., Al-Jumaily A.M., Simpkin R. // J. Signal and Information Processing. 2013. № 4. P. 96.
7. Zhang Z.Q., Liu Q.H., Xiao C. et al. // IEEE Trans. 2003. V. BE-50. № 10. P. 1180.
8. Бульба А.В. Введение в цифровую голографию. Петрозаводск, 2009 (<http://dfe.karelia.ru/koi/posob/hologr/hologr.pdf>).
9. Зверев В.А. Радиооптика. М.: Сов. радио, 1975.
10. Чанурский В.В. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2011. № 4. P. 72.
11. Razevig V.V., Chizh M.A., Chapursky V.V. et al. // Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS). Shanghai, 8–11 August. 2016. China. P. 2137–2141. doi 10.1109/PIERS.2016.7734891 (http://www.rslab.ru/downloads/2_Razevig.pdf).
12. Разевиг В.В., Бугаев А.С., Ивашов С.И. и др. // Успехи совр. радиоэлектроники. 2012. № 3. С. 3.
13. Zhuravlev A., Razevig V., Chizh M. et al. // Proc. 16th Intern. Conf. Ground Penetrating Radar (GPR). Hong Kong. 13–16 June, 2016. China. P. 196 (<https://ieeexplore.ieee.org/document/7572628/>).
14. Черепенин В.А., Журавлев А.В., Чиж М.А. и др. // РЭ. 2017. Т. 62. № 7. С. 672.
15. Чиж М.А. // Радиотехника. 2016. № 5. С. 134.
16. Zhuravlev A., Razevig V., Tataraidze A. et al. // Proc. IEEE Intern. Symp. on Phased Array Systems and Technology (PAST). Waltham, Oct. 18–21, 2016. ISSN 1554-8422 (<http://www.rslab.ru/downloads/07832601.pdf>).
17. Zhuravlev A., Razevig V., Vasiliev I. et al. // Proc. SPIE 9401, Computational Imaging XIII March 13, 2015. P. 94010I-1 (doi 10.1117/12.2081761), (<http://www.rslab.ru/downloads/9AC680F5CB15.pdf>).
18. Антипов В.Н., Горяинов В.Т., Кулин А.Н. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. М.: Радио и связь, 1988.