

11
Метод рециркуляции сигналов в задаче наблюдения точечного объекта над металлической поверхностью

© В.В. Чапурский,¹ В.И. Калинин,² А.С. Бугаев,³ В.В. Разевиг¹

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005 Москва, Россия

² Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190 Фрязино, Московская обл., Россия

³ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009 Москва, Россия
e-mail: valch2008@yandex.ru

Поступило в Редакцию 12 июля 2018 г.

В окончательной редакции 10 января 2019 г.

Принято к публикации 11 марта 2019 г.

В задаче локализации положения точечного объекта над металлической отражающей поверхностью проанализировано применение сверхширокополосного сигнала в сантиметровом диапазоне длин волн с использованием метода рециркуляции сигналов в кольцах пространственной рециркуляции „излучатель—цель—элемент приемной антенной решетки—излучатель“. Определение координаты объекта над металлической поверхностью основано на вычислении обобщенного корреляционного интеграла в спектральной форме для частотных коэффициентов передачи колец рециркуляции по всем приемным элементам с учетом координат истинного объекта, его зеркального отражения и опорной точки пространства. Дано сопоставление результатов зондирования при наличии и отсутствии рециркуляции.

Ключевые слова: рециркуляция сигнала, обобщенный корреляционный интеграл, антенная решетка, зеркальное отражение, антипод.

DOI: 10.21883/JTF.2019.08.47901.272-18

Введение

Одной из первых работ по рециркуляционным антенным решеткам (АР) была работа [1], а применение таких АР в радиолокации рассматривалось в [2–4]. Теме шумовой радиолокации с рециркуляцией сигналов посвящены работы [5,6]. В последние годы интерес к системам с рециркуляцией сигналов и число публикаций по теории и практическим аспектам их применения заметно увеличилось (см., например, [7–9]). Работа [9] посвящена определению обобщенной функции неопределенности по пространственным координатам на основе обобщенного корреляционного интеграла обработки (ОКИ) при использовании метода рециркуляции в мультистатической радиолокации (МРГ) [10], характеризуемой применением АР. Вместе с тем использование метода рециркуляции в МРГ может иметь ограничения при получении радиоизображений (РИ) многоточечных объектов, исследование которых требует специального анализа.

Наиболее простым в этом плане является случай наблюдения малой неоднородности или точечного объекта в воздухе над идеально отражающей металлической поверхностью. Спецификой такой задачи является наличие зеркального отражения или „антипода“, который расположен симметрично относительно точечного объекта и находится ниже плоскости металлической поверхности. В классическом варианте МРГ наличие ан-

типода может приводить к плохому разрешению и смещению координаты истинной отметки в особенности при недостаточной ширине спектра зондирующего сигнала (ЗС). Несомненный интерес представляет формализация и решение этой задачи в случае применения метода рециркуляции сигналов в кольцах пространственной обратной связи „излучатель—точечная цель—элемент приемной АР—излучатель“. Это обусловлено известным явлением повышения пространственного разрешения при использовании метода рециркуляции [4,6,9].

В настоящей работе рассмотрена микроволновая система получения РИ на основе рециркуляционной антенной системы (АС) при наблюдении точечного рассеивающего объекта в воздухе на фоне антипода, вызванного отражением от металлической поверхности. Предполагается, что объект расположен в воздухе ($\epsilon = 1$) на произвольной высоте между центром АС, плоскость которой параллельна идеально отражающей бесконечной металлической поверхности, при малых расстояниях между ними, составляющих не более единиц dm . Решение этой частной задачи актуально вследствие того, что метод рециркуляции может быть применен и при зондировании малых неоднородностей над металлической поверхностью в слое диэлектрика с $\epsilon > 1$. Это может иметь практическое значение в задачах диагностики диэлектрических покрытий [11,12], но потребует дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

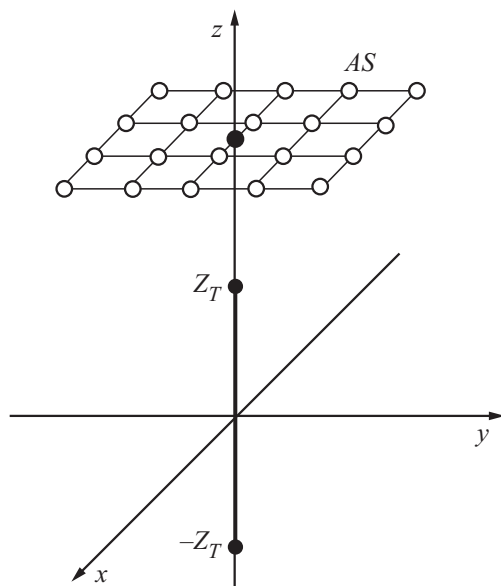


Рис. 1. Вид относительного положения объекта в точке z_T , его антипода и антенной системы (светлые кружки — приемная АР, черный кружок — излучающий элемент). Металлическая поверхность в плоскости $(x, y, 0)$.

1. Теория наблюдения точечного объекта над металлической поверхностью при методе рециркуляции сигналов

Рассмотрим АС в виде квадратной приемной АР и одного передающего элемента, например, расположенного в центре приемной АР. Положения АС, точечного объекта и металлической поверхности показаны на рис. 1 в декартовой системе координат (x, y, z) . Металлическая поверхность лежит в плоскости $(x, y, 0)$, а точечный объект находится в точке с координатами $(0, 0, z_T)$. В условиях идеального отражения от металлической поверхности последняя может быть заменена зеркальным точечным объектом (антиподом) с координатами $(0, 0, -z_T)$, также показанным на рис. 1. В условиях малых расстояний между АС и металлической поверхностью в качестве зондирующего сигнала (ЗС) передающего элемента принят сверхширокополосный (СШП) ЗС с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ).

1.1. Модель ЛЧМ сигнала передающего элемента АС

Предположим, что передающий элемент АС излучает на средней частоте ω_0 действительный полосовой ЗС $u(t)$ с комплексным спектром $\dot{G}_u(\omega)$, которые связаны парой преобразований Фурье. В силу действительности сигнала $u(t)$ его спектр имеет две симметричные ветви на средних частотах ω_0 и $-\omega_0$ [13,14]. В [14] показано, что для таких сигналов, в том числе сверх-

широкополосных, остается справедливой традиционная для узкополосных сигналов форма представления в виде комплексного аналитического сигнала $\dot{u}(t)$:

$$\dot{u}(t) = \dot{U}(t) \exp(j\omega_0 t). \tag{1}$$

Точка над переменными здесь и далее обозначает комплексные значения. При этом спектры комплексной амплитуды $\dot{U}(t)$ и аналитического сигнала (1) связаны между собой и со смещенной в область низких частот спектральной функцией $\dot{G}_u(\omega)$ действительного ЗС $u(t)$ формулами [13]:

$$\dot{G}_{\dot{U}}(\omega) = \dot{G}_u(\omega_0 + \omega) = \begin{cases} 2\dot{G}_u(\omega_0 + \omega), & \omega > -\omega_0, \\ \dot{G}_u(\omega_0 + \omega), & \omega = -\omega_0, \\ 0, & \omega < -\omega_0. \end{cases} \tag{2}$$

Для ЛЧМ ЗС $u(t)$ с девиацией $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$ модуль спектра при большой частотно-временной базе на положительных частотах в основном сосредоточен в полосе $[\omega_0 - \Delta\omega/2, \omega_0 + \Delta\omega/2]$ [14]. Тогда при $\omega_0 > \Delta\omega/2$ его аналитический сигнал с прямоугольной огибающей $a(t)$ единичной амплитуды и длительности T может быть записан в форме (1), где

$$\dot{U}(t) = a(t) \exp(-j\beta t^2/2), \tag{3}$$

$\beta = 2\pi\gamma$, γ — скорость изменения циклической частоты ЛЧМ ЗС, а частотно-временная база ЛЧМ определена как $B = \Delta f T = \gamma T^2$ [14]. Пример нормированного модуля спектра комплексной амплитуды (3) $\dot{U}(t)$ аналитического сигнала представлен на рис. 2 для параметров $T = 10^{-7}$ с, которые соответствуют большой величине частотно-временной базы $B = 800$. Спектр рассчитывался с помощью интегралов Френеля и результатов, приведенных в [14,15].

Таким образом, при большой частотно-временной базе ЛЧМ $B \gg 1$, и, в частности, при $B = 800$, отвечающей ЛЧМ ЗС для варианта системы с рециркуляцией сигналов, анализируемой далее, модуль спектра Фурье

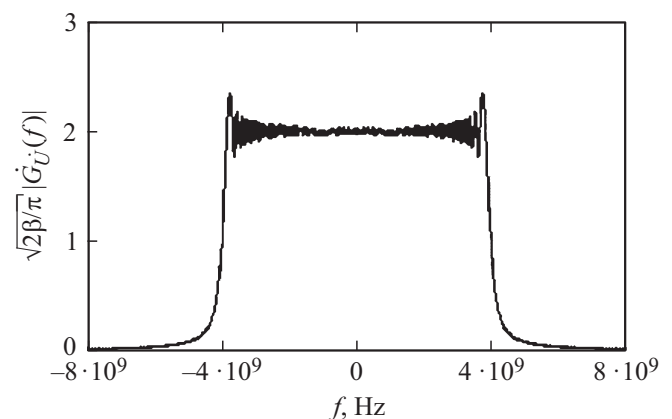


Рис. 2. Нормированный модуль спектра комплексной амплитуды $\dot{U}(t)$ ЛЧМ ЗС при $B = 800$.

$|\dot{G}_U(\omega)|$ комплексной огибающей $\dot{U}(t)$ (3) аналитического ЛЧМ ЗС (1) имеет зависимость, близкую к прямоугольной.

1.2. Обобщенный корреляционный интеграл обработки в системе с рециркуляцией для точечного объекта при наличии антипода

Представим вектора координат передающего и $N_r + 1$ приемных элементов АС соответственно в виде $\mathbf{r}_t = \|\mathbf{0}, 0, z_t\|'$, $\mathbf{r}_{rk} = \|x_{rk}, y_{rk}, z_t\|'$, где штрих — символ транспонирования вектора, и $k = 0, \dots, N_r$. Произвольную точку пространства в координатах (x, y, z) задаем вектором $\mathbf{R} = \|x, y, z\|'$, при котором задержки распространения в кольце пространственной рециркуляции „передающий элемент—точечный объект в точке \mathbf{R} — k -й приемный элемент“ равны

$$\tau_k(\mathbf{R}) = c^{-1}\{|\mathbf{R} - \mathbf{r}_t| + |\mathbf{R} - \mathbf{r}_{rk}|\}, \quad (4)$$

где c — скорость света, $|\mathbf{r}|$ — символ модуля вектора.

В рециркуляционных системах локации принятый отраженный от цели сигнал частично вводится в тракт передачи и в сумме с ЗС передатчика вновь излучается в направлении цели [1,2]. При наличии рециркуляции в пространственном кольце обратной связи при одном точечном объекте локации с задержкой распространения $\tau_k(\mathbf{R})$ для пары „передающий элемент—объект— k -й приемный элемент“ коэффициент передачи кольца рециркуляции при большом, в пределе бесконечном числе рециркуляций с точностью до постоянного множителя, составит [6,9]

$$\dot{K}_k(\omega; \rho, \mathbf{R}) = \frac{\exp(-j\omega\tau_k(\mathbf{R}))}{1 - \rho \exp(-j\omega\tau_k(\mathbf{R}))}. \quad (5)$$

В формуле (5) ρ есть коэффициент передачи в пространственной петле положительной обратной связи ($0 < \rho < 1$) при отражении сигнала от точечного объекта. Тогда спектр Фурье $\tilde{v}_k(j\omega)$ сигнала $v_k(t)$ на выходе пространственного рециркулятора равен

$$\begin{aligned} \tilde{v}_k(j\omega; \rho, \mathbf{R}) &= \dot{K}_k(\omega; \rho, \mathbf{R})\tilde{s}(j\omega) \\ &= \dot{K}_k(\omega; \rho, \mathbf{R})\dot{G}_U(\omega - \omega_0), \end{aligned} \quad (6)$$

поскольку $\tilde{s}(j\omega) = \dot{G}_U(\omega - \omega_0)$ — спектр Фурье аналитического ЗС (1).

В рассматриваемом нами случае зеркального отражения от металлической поверхности и наблюдения по рис. 1 имеем реальную и виртуальную точки рассеяния с координатами объекта и антипода

$$\mathbf{R}_1(z_T) = \|\mathbf{0}, 0, z_T\|', \quad \mathbf{R}_2(z_T) = \|\mathbf{0}, 0, -z_T\|'. \quad (7)$$

При этом результирующие коэффициенты передачи для всех $N_r + 1$ колец рециркуляции для точечного

объекта с координатой z_T , расположенного над металлической плоскостью, с учетом отражения от объекта и от металлической поверхности составят:

$$\begin{aligned} \dot{K}_{\Sigma k}(\omega; \rho, z_T) &= \\ &= \frac{\{\dot{q}_1 \exp[-j\omega\tau_k(\mathbf{R}_1(z_T))] + \dot{q}_2 \exp[-j\omega\tau_k(\mathbf{R}_2(z_T))]\}}{1 - \rho\{\dot{q}_1 \exp[-j\omega\tau_k(\mathbf{R}_1(z_T))] + \dot{q}_2 \exp[-j\omega\tau_k(\mathbf{R}_2(z_T))]\}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $k = 0, \dots, N_r$, \dot{q}_1 и \dot{q}_2 — в общем случае комплексные коэффициенты отражения для истинного и зеркального сигналов, принимаемые при отражении от металлической плоскости одинаковыми по модулю $|\dot{q}_1| = |\dot{q}_2| = q$ и противоположными по фазе $\dot{q}_1 = q$, $\dot{q}_2 = q \cdot e^{j\pi} = -q$, а ρ — коэффициент обратной связи в кольце рециркуляции.

Для опорной виртуальной цели с координатой z_0 будем иметь коэффициент передачи кольца рециркуляции $\dot{K}_{0k}(\omega; \rho_0, z_0)$, задаваемый формулой (5) в общем случае при ином $\rho = \rho_0$ и использовании вместо \mathbf{R} опорного вектора $\mathbf{R}(z_0) = \|\mathbf{0}, 0, z_0\|'$. Соответственно вместо (6) следует записать

$$\begin{aligned} \tilde{v}(j\omega; \rho_0, z_0) &= \dot{K}_{0k}(\omega; \rho_0, z_0)\tilde{s}(j\omega) \\ &= \dot{K}_{0k}(\omega; \rho_0, z_0)\dot{G}_U(\omega - \omega_0). \end{aligned} \quad (9)$$

При этом ОКИ в спектральной форме [6,9] для спектров Фурье $\tilde{v}_{\Sigma k}(j\omega; \rho, z_T)$ и $\tilde{v}_k(j\omega; \rho_0, z_0)$ с учетом суммирования по всем элементам приемной АР приобретает следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{Q}(z_0, z_T) &= Q_{\max}^{-1} \sum_{k=0}^{N_r} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{K}_{\Sigma k}(\omega - \omega_0; \rho, z_T) \\ &\times \dot{K}_{0k}^*(\omega - \omega_0; \rho_0, z_0) |\dot{G}_U(\omega)|^2 d\omega, \end{aligned} \quad (10)$$

где $*$ — символ комплексного сопряжения, Q_{\max}^{-1} — нормирующий множитель, обеспечивающий максимальное значение модуля $|\dot{Q}(z_T, z_T)|$, равное единице. Приближенное интегрирование в (10) выполнялось численно в пределах полосы частот $|\omega| \leq \Delta\omega$, вне которой модуль спектра $|\dot{G}_U(\omega)|$ близок к нулю (рис. 2). Представленный результат (10) с учетом коэффициентов передачи колец рециркуляции (5) и (8), спектра ЗС (2), выражений для задержек (4) и значений векторов положения элементов АС \mathbf{r}_t и \mathbf{r}_{rk} позволяет рассчитать зависимости модуля ОКИ (10) $|\dot{Q}(z_0, z_T)|$ в функции z_0 при фиксированном z_T . На основании рассчитанной зависимости возможна оценка разрешающей способности при заданном положении точечного объекта z_T в присутствии зеркального переотражения при использовании метода рециркуляции сигналов и заданных значениях истинного и опорного коэффициентов обратной связи ρ и ρ_0 пространственных колец рециркуляции.

В отсутствие рециркуляции имеет место случай классической радиолокации [10]. При этом ОКИ в условиях приема суммы сигналов от реальной и зеркальной

точечных целей определялся на основании известной методики [10] при $P = 1$ и опорном сигнале, соответствующем одиночной виртуальной цели с опорным вектором координат $\mathbf{R}(z_0) = \|\mathbf{0}, \mathbf{0}, z_0\|'$:

$$\dot{Q}(z_0, z_T) = Q_{\max}^{-1} \sum_{k=0}^{N_r} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{p=0}^P \dot{q}_p \exp[j(\omega + \omega_0) \times \Delta\tau_p(z_0, z_T, k)] |\dot{G}_U(\omega)|^2 d\omega, \quad (11)$$

где $P = 1$, $\Delta\tau_p(z_0, z_T, k) = \tau_k(\mathbf{R}(z_0)) - \tau_k(\mathbf{R}_p(z_T))$ при $p = 0, 1$, $\tau_k(\mathbf{R})$ дается формулой (4), а $\mathbf{R}_1(z_T)$ и $\mathbf{R}_2(z_T)$ — формулами (7). В приближении прямоугольной формы спектра интегрирование по частоте в (11) выполняется аналитически, и ОКИ в случае классической радиолокации приобретает вид

$$\dot{Q}(z_0, z_T) \approx Q_{\max}^{-1} \sum_{k=0}^{N_r} \sum_{p=0}^P \dot{q}_p \exp[j\omega_0 \Delta\tau_p(z_0, z_T, k)] \times \text{sinc} \left[\frac{\Delta\omega}{2} \Delta\tau_p(z_0, z_T, k) \right]. \quad (12)$$

Формулы (10)–(12) позволяют производить сравнение разрешающей способности РИ, полученных при классической радиолокации и при методе рециркуляции в задаче наблюдения точечного объекта над металлической поверхностью. Соответствующие количественные результаты приводятся в примерах разд. 2.

2. Примеры фокусировки при наличии и отсутствии рециркуляции

Анализировались примеры систем зондирования с наличием и отсутствием рециркуляции, содержащих АС в виде одного передающего элемента и приемной эквидистантной АР. Рассматривался случай малого расстояния от АС до металлической поверхности, между которыми находился точечный объект. Размеры приемной АР выбраны сопоставимыми с расстоянием от АР до металлической поверхности, что теоретически улучшает избирательность по глубине залегания при зондировании. Параметры системы одинаковые для датчика на основе рециркуляции сигналов и на основе метода классической радиолокации были следующими:

- средняя частота ЛЧМ ЗС 16 GHz;
- девиация ЛЧМ сигнала 8 GHz;
- число передающих элементов 1;
- размеры приемной эквидистантной АР 7×7 см;
- число элементов приемной АР 5×5 ;
- расстояние плоскости АС от металлической поверхности 10 см.

2.1. Фокусировка при наличии рециркуляции

При реализации метода рециркуляции особую роль играет выбор величины коэффициентов положительной обратной связи $\rho < 1$ и $\rho_0 < 1$. Этот выбор зависит от интенсивности принимаемых сигналов q_1 и q_2 , которые входят в выражения для коэффициентов передачи колец рециркуляции в (10) с учетом (5) и (8). Задание ρ и ρ_0 не должно приводить к появлению сингулярности модулей коэффициентов передачи во всем интервале значений z_T и z_0 вследствие равенства нулю знаменателей в (5) и (8). В частности, выбранные при расчетах значения $q_1 = q_2 = 1.0$ и $\rho_0 = 0.65$, $\rho = 0.4$ удовлетворяли данному условию в интервалах значений $|z_0| < 10$ см и $|z_T| < 10$ см при исходных данных рассмотренной системы зондирования.

Результаты расчета РИ объекта в виде зависимостей квадрата модуля ОКИ от вертикальной координаты z_0 при наличии рециркуляции даны на рис. 3 при трех значениях координаты z_T точечного объекта. Зависимости получены по формуле (10), учитывающей точную форму модуля спектра $|\dot{G}_U(\omega)|$. Отметим, что дополнительно проводившееся сопоставление с результатами, рассчитанными при прямоугольной аппроксимации модуля спектра, показало идеальное совпадение с результатами, полученными при точной форме модуля спектра

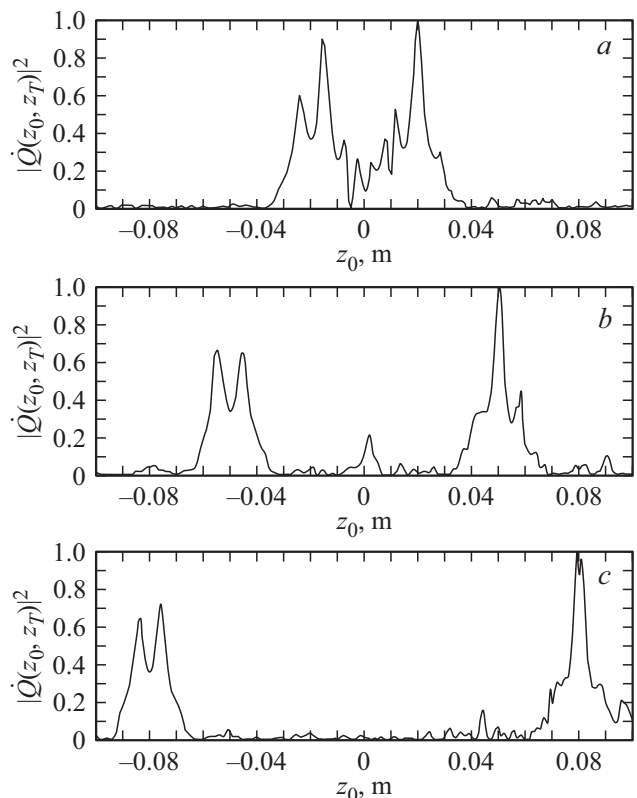


Рис. 3. Зависимости нормированного квадрата модуля ОКИ от опорной координаты z_0 при методе рециркуляции для $\rho_0 = 0.65$, $\rho = 0.4$ и истинных координатах объекта $z_T = 2$ (a), 5 (b) и 8 см (c).

в области положительных значений $z_0 > 0$, и малые, практически не значимые, отличия в области антипода при $z_0 < 0$. Из представленных зависимостей следует, что имеет место заметное подавление лепестка РИ на координате зеркального объекта, в то время как главный лепесток РИ сохраняет свое максимальное значение и с высокой точностью соответствует истинной координате z_T . Ширина этого лепестка по условному уровню 0.7, определяющая разрешающую способность и точность измерения координаты z_T , составляет менее 0.5 см.

2.2. Фокусировка методом классической радиоголографии

В случае классической радиоголографии (при отсутствии рециркуляции) зависимости $|\dot{Q}(z_0, z_T)|^2$ от z_0 в интервале $|z_0| \leq 10$ см показаны на рис. 4 для двух значений положения точечного объекта $z_T = 2$ см и $z_T = 5$ см. На рис. 4, *a* при $z_T = 2$ см положения максимумов нормированного модуля ОКИ незначительно смещены в сторону металлической поверхности. Это обусловлено взаимным влиянием прямого и зеркального изображений и их боковых лепестков при малом расстоянии z_T точечного объекта до поверхности. При увеличении расстояния $z_T \geq 5$ см (рис. 4, *b*), как показали дополнительные расчеты, смещение максимума главного лепестка изображения относительно истинного значения практически отсутствует.

В целом на основании результатов, полученных при классической радиоголографии, т.е. в отсутствие рециркуляции видно, что результаты фокусировки имеют максимумы, вполне соответствующие как истинному положению объекта, так и его зеркальному отражению. Однако ширина главных лепестков по условному уров-

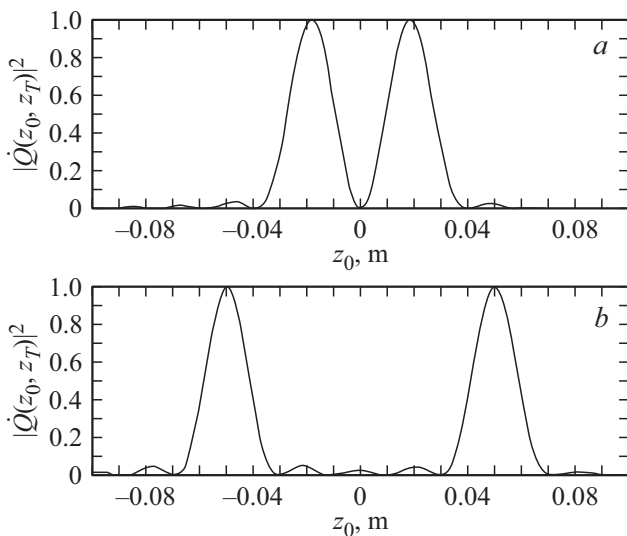


Рис. 4. Зависимость нормированного квадрата модуля ОКИ в случае классической радиоголографии от опорной координаты z_0 при истинной координате объекта $z_T = 2$ (*a*), 5 см (*b*).

ню 0.7 в данном случае более чем в 3 раза превосходит ширину главного лепестка при наличии рециркуляции.

Заключение

Поставлена и теоретически решена задача наблюдения точечного объекта на фоне отражения от металлической поверхности при использовании метода рециркуляции сигналов. Рассмотрен случай антенной системы, состоящей из одиночного передающего элемента и эквидистантной приемной антенной решетки (АР). При осуществлении режима рециркуляции сверхширокополосного ЛЧМ сигнала в пространственных кольцах обратной связи „излучающий элемент—цель—индивидуальный приемный элемент АР—излучающий элемент“ получено выражение для обобщенного корреляционного интеграла обработки, учитывающее зеркальное отражение точечного объекта от металлической поверхности. Построение радиоизображения в виде квадрата модуля корреляционного интеграла при методе рециркуляции сигналов показало возможность получения высокого разрешения по координате объекта, достигающего единиц миллиметров, а также наличие заметного подавления зеркального максимума РИ.

На конкретном примере зондирования при высоте плоскости АС над металлической поверхностью, равной 10 см, проведено сравнение результатов, полученных методом рециркуляции сигналов, с методом классической радиоголографии при одинаковых пространственно-частотных параметрах антенной системы, зондирующих сигналов и положениях объектов над металлической поверхностью. Получено, что разрешающая способность системы на основе метода рециркуляции более чем в 3 раза превосходит аналогичную характеристику при методе классической радиоголографии. При этом отсутствует значимое смещение максимума истинного РИ относительно точечного объекта в рассмотренном интервале высот точечного объекта над металлической поверхностью, а также обнаружен эффект заметного подавления РИ зеркального отражения, отсутствующий при методе классической радиоголографии.

Дальнейшие теоретические, а также экспериментальные исследования могут быть направлены на рассмотрение и анализ вариантов систем построения радиоизображений на основе метода рециркуляции сигналов при зондировании точечных неоднородностей, расположенных над металлической поверхностью в диэлектрическом слое с заданной диэлектрической проницаемостью применительно к задачам диагностики диэлектрических покрытий металлических объектов [11,12]. Также представляют интерес вопросы выбора иных вариантов антенных систем, ориентированных на конкретные практические задачи.

Финансирование работы

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-00126).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Pon C.Y.* // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1964. N 2. March. P. 176–180.
- [2] Морская радиолокация / Под ред. В.И. Винокурова. Л.: Судостроение, 1986. С. 196–200.
- [3] *Калинин В.И., Кузмичев В.Е., Мясин Е.А.* и др. АС. № 792183. Бюлл. изобретений № 48. 1980.
- [4] *Калинкевич А.А., Крылова М.С., Турыгин М.С.* // Сборник докладов Всероссийской научной конференции „Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике“. Муром. 1–3 июля 2003. С. 415–419.
- [5] *Gupta Shalab, Brown T.R.* // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2007. Vol. 43. N 2. April. P. 472–479.
- [6] *Калинин В.И., Чапурский В.В.* // РЭ. 2008. Т. 53. Вып. 10. С. 1266–1277.
- [7] *Buchanan N.B., Fusco V.* // Proceedings of the 7th European Radar Conference. 30 September–1 October 2010. Paris. France. P. 133–136.
- [8] *Hallbjörner P., Cheng S.* // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2013. Vol. 12. P. 1085–1088.
- [9] *Калинин В.И., Чапурский В.В.* // 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
- [10] *Чапурский В.В.* // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана Сер. Приборостроение. 2011. Вып. 4. С. 72–91.
- [11] *Ивашов С.И., Разевиг В.В., Васильев И.А., Шитиков В.С.* // Контроль. Диагностика. 2014. Вып. 12. С. 52–61.
- [12] *Ивашов С.И., Бугаев А.С., Журавлев А.В., Разевиг В.В., Чиж М.А., Ивашов А.И.* // ЖТФ. 2018. Т. 88. Вып. 2. С. 268–275.
- [13] *Евсиков Ю.А., Чапурский В.В.* Преобразование случайных процессов в радиотехнических устройствах. М.: Высшая школа, 1977. 264 с.
- [14] *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы. Ч. 1. М.: Советское радио, 1966. 608 с.
- [15] *Boersma J.* // Math. Comp. 1960. Vol. 14. N 380.