

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MODELING AND SIMULATION

УДК 621.391

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-848-856

ОЦЕНИВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ КВАЗИНЕПРЕРЫВНОМ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОМ ЗОНДИРУЮЩЕМ СИГНАЛЕ

М.В. Самойленко

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, 125080, Российская Федерация

Адрес для переписки: Samoi.Mar@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 03.09.20, принята к печати 15.10.20

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Самойленко М.В. Оценка распределения отражательных характеристик при квазинепрерывном сверхширокополосном зондирующем сигнале // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 6. С. 848–856. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-848-856

Аннотация

Предмет исследования. Представлен новый метод оценивания распределения отражательной характеристики по заданному объему — зоне ответственности. Такое распределение позволяет выявлять неоднородности, обнаруживать и оценивать отражательные характеристики малоразмерных объектов в однородной среде. Задача решается с использованием зондирующего сверхширокополосного непрерывного сигнала и множества приемных датчиков. **Метод.** Метод основан на принципах томографического подхода в обработке сигналов — многоканальной томографии. Зона ответственности разбивается на элементы разрешения. Распределение отражательной характеристики ищется в дискретизированном варианте как вектор отражений, каждая компонента которого есть отражательная характеристика соответствующего элемента разрешения. В качестве отражательных характеристик элементов разрешения рассматриваются удельные эффективные поверхности рассеяния. Согласно принципам многоканальной томографии получено векторно-матричное уравнение отображения, в котором оригиналом является вектор отражений, а отображением — объединенные в вектор измерения приемных датчиков. Это уравнение является исходным для оценивания вектора отражений. Рассмотрены три варианта оценивания: методом псевдообращения, методом псевдообращения с усреднением и новым методом на основе корреляционной обработки. **Основные результаты.** С использованием компьютерных экспериментов выполнен анализ возможностей предложенного метода оценивания распределения отражательных характеристик по элементам разрешения, на которые разбита зона ответственности. Эксперименты показали преимущество корреляционного метода: этот метод, в отличие от методов псевдообращения, позволяет выявлять отражающие элементы разрешения как при увеличении их числа в зоне ответственности, так и при наличии искажений зондирующего сигнала. **Практическая значимость.** Результаты работы могут найти применение, например, в области подповерхностного зондирования для выявления неоднородностей в однородной среде.

Ключевые слова

отражательные характеристики, эффективная поверхность рассеяния, сверхширокополосный сигнал, многоканальная томография, элементы разрешения

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-848-856

DISTRIBUTION EVALUATION OF REFLECTIVE CHARACTERISTICS WITH QUASI-CONTINUOUS ULTRA-WIDEBAND PROBING SIGNAL

M.V. Samoilenko

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125080, Russian Federation

Corresponding author: Samoi.Mar@mail.ru

Article info

Received 03.09.20, accepted 15.10.20

Article in Russian

For citation: Samoilenko M.V. Distribution evaluation of reflective characteristics with quasi-continuous ultra-wideband probing signal. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 6, pp. 848–856 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-848-856

Abstract

Subject of Research. The paper presents a new method for distribution evaluation of the reflective characteristics over a given volume — control zone. This distribution makes it possible to identify inhomogeneities, detect and evaluate the reflective characteristics of small-size objects in a homogeneous environment. The problem is solved using a probing ultra-wideband continuous signal and a set of receiving sensors. **Method.** The method is based on the principles of the tomography approach in signal processing — multichannel tomography. The control zone is divided into resolution elements. The distribution of the reflective characteristics is searched in a discretized form as the reflective characteristics vector with each component equal to reflective characteristic of corresponding resolution element. Specific effective scattering surfaces are considered as reflective characteristics of resolution elements. According to the principles of the multichannel tomography, a vector-matrix mapping equation is obtained, in which the reflection vector is the original, and the mapping is the measurements of the receiving sensors combined into a vector. This equation is the starting point for the reflection vector evaluation. Three variants of estimation are considered: the pseudo-inversion method, the pseudo-inversion method with averaging, and a new method based on correlation processing. **Main Results.** The analysis is carried out on the capabilities of the proposed method by computer experiments for the distribution evaluation of reflective characteristics by resolution elements, into which the area of responsibility is divided. Experiments have shown the advantage of the correlation method: this method, in contrast to pseudo-inversion methods, makes it possible to identify reflective resolution elements both when their number increases in the control zone and in the presence of the probing signal distortions. **Practical Relevance.** The results of the work can find application, for example, in the field of subsurface probing to identify inhomogeneities in a homogeneous medium.

Keywords

reflective characteristics, effective scattering surface, ultrawideband signal, multichannel tomography, resolution elements

Введение

В настоящее время большой интерес проявляется к использованию сверхширокополосных (СШП) сигналов в различных задачах: для определения состояния протяженных объектов, сред, объемов пространства, в подповерхностном зондировании и др. Это обусловлено тем, что СШП сигналы имеют ряд преимуществ по сравнению с узкополосными сигналами. Они позволяют достигать большей точности измерений, труднее поддаются обнаружению и подавлению в задачах разведывательного характера; обладают большей проникающей способностью, что позволяет применять их для зондирования скрытых объектов, например, для подповерхностного обнаружения неоднородностей.

Актуальными задачами в области СШП систем являются разработки: моделей сигналов и их взаимодействия с объектами; методов обработки СШП сигналов; извлечения полезной информации. Этим вопросам, как в прошлом, так и в настоящее время, посвящается множество работ, например [1–12]. В большинстве работ объекты зондирования рассматриваются как единое целое, отражательные характеристики — как характеристики всего объекта. Например, эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) считается единой величиной для всего объекта; анализируется и измеряется частотная зависимость этой величины или зависимость ее от ракурса объекта, но в любом случае она характеризует объект в целом. Такие измерения важны во многих задачах, однако, они становятся малоинформативными, например, в случае если в зону ответственности попадает не один, а несколько объектов: они будут восприниматься как одна цель с единой характеристикой, уже не вполне адекватной ситуации. То же относится и к подповерхностному зондированию в случае не одной, а нескольких неоднородностей в зоне ответственности, которая зондируется СШП сигналом.

В данной работе ставится задача оценивания распределения отражательных характеристик по зоне

ответственности. Решается эта задача методом, который разработал доктор технических наук, профессор Виталий Иванович Самойленко. В основе метода лежит им же предложенный томографический подход в обработке сигналов — *многоканальная томография* [13, 14].

В настоящей работе представлено математическое обоснование метода оценивания распределения плотности ЭПР по зоне ответственности при зондировании ее непрерывным (квазинепрерывным) СШП сигналом и оценка потенциальной возможности применения этого метода с помощью компьютерного моделирования.

Физическая постановка задачи

Падающий на объект СШП сигнал вызывает два явления при его рассеянии. Первое — это вынужденное отражение, второе — собственное рассеяние. Вынужденное отражение представляет собой отраженный объектом сигнал той же формы, что и падающее на объект излучение. Собственное рассеяние обусловлено характерными резонансными свойствами объекта в отношении отдельных составляющих спектра падающего излучения. Какое из этих явлений преобладает, зависит от ряда факторов, например, от соотношения частотного диапазона зондирующего сигнала и размеров облучаемого объекта, а также от особенностей самого объекта. Будем полагать, что модель рассеяния соответствует модели отражения СШП сигнала.

Пусть зона ответственности — это однородная область пространства, в которой находится ограниченное число неоднородностей. Это может быть подповерхностная область с неоднородностями или свободное пространство с отражающими объектами в нем. Ставится задача выявить эти неоднородности и оценить их отражательные характеристики.

Будем решать задачу, основываясь на детальном структурном анализе распределения отражательной характеристики — плотности ЭПР — по объему зоны ответственности. Обозначим распределение плотно-

сти ЭПР как $f(\mathbf{r})$, где \mathbf{r} — трехмерный координатный вектор.

Ставится задача оценить распределение плотности ЭПР $f(\mathbf{r})$ по зоне ответственности. Зона ответственности облучается непрерывным СШП сигналом; переотраженный зондирующий сигнал измеряется множеством приемных датчиков интегрального типа.

Математическая постановка задачи

На рис. 1 представлена геометрия задачи. В начале координат O расположен источник зондирующего СШП сигнала $\varphi(t)$, которым облучается зона ответственности. Переотраженный сигнал принимается датчиками интегрального типа. Координаты i -го датчика D_i обозначены как \mathbf{r}_{Di} . Этот датчик принимает сигнал, переотраженный точкой с координатами \mathbf{r} , с запаздыванием, равным

$$t_{zi} = (\|\mathbf{r}\| + \|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{Di}\|)/v, \tag{1}$$

где v — скорость распространения сигнала в среде.

Интенсивность переотраженного от рассматриваемой точки \mathbf{r} сигнала пропорциональна плотности ЭПР в этой точке $f(\mathbf{r})$. С учетом диаграмм направленности (ДН) источника и i -го датчика, принимаемый этим датчиком сигнал от точки с координатами \mathbf{r} равен

$$g_i(\mathbf{r}, t) = F_{ист}(\mathbf{r})F_{при}(\mathbf{r})f(\mathbf{r})\varphi(t - t_{zi}(\mathbf{r})), \tag{2}$$

где $t_{zi}(\mathbf{r})$ определяется выражением (1); $F_{ист}(\mathbf{r})$ — ДН источника зондирующего сигнала; $F_{при}(\mathbf{r})$ — ДН i -го датчика.

Чтобы получить суммарный сигнал, принимаемый i -м датчиком, проинтегрируем (2) по всей зоне ответственности:

$$g_i(t) = \int_{\mathbf{r}} F_{ист}(\mathbf{r})F_{при}(\mathbf{r})f(\mathbf{r})\varphi(t - t_{zi}(\mathbf{r}))d\mathbf{r}. \tag{3}$$

Входящее в подынтегральное выражение произведение $F_{ист}(\mathbf{r})F_{при}(\mathbf{r})\varphi(t - t_{zi}(\mathbf{r}))$ будем рассматривать как весовую функцию. Требуется определить взвешенную подынтегральную функцию — распределение $f(\mathbf{r})$ — по множеству измерений интегрального типа $g_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, M$, где M — число датчиков. Это задача многоканальной томографии.

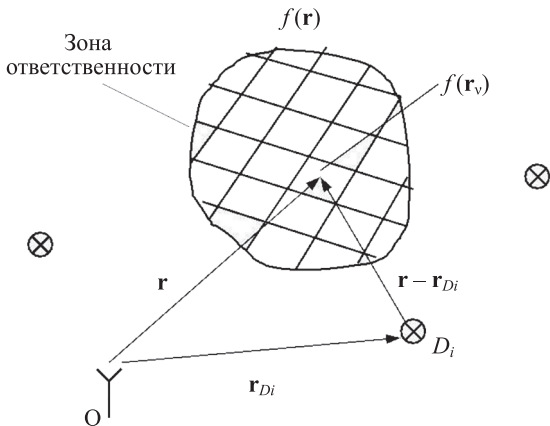


Рис. 1. Геометрия задачи: приемные датчики обозначены как ⊗; сигнал $\varphi(t)$ излучается источником, расположенным в точке O

Решение

Согласно принципам многоканальной томографии решение задачи включает два этапа. Первый этап заключается в формировании уравнения отображения, второй — в оценивании искомого распределения по уравнению отображения.

1. Формирование уравнения отображения

Разобьем зону ответственности на множество элементарных объемов — элементов разрешения (ЭР). Пронумеруем их и зафиксируем координаты центров: $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N$, где N — число ЭР в зоне ответственности. С учетом сделанного разбиения перейдем от интеграла (3) к сумме:

$$g_i(t) \approx \sum_{v=1}^N F_{ист}(\mathbf{r}_v)F_{при}(\mathbf{r}_v)f(\mathbf{r}_v)\varphi(t - t_{zi}(\mathbf{r}_v))\Delta, \tag{4}$$

где v — номер ЭР; Δ — объем ЭР, примем $\Delta = 1$.

В полученном выражении $f(\mathbf{r}_v)$ — удельная ЭПР v -го ЭР. Совокупность $f(\mathbf{r}_v)$, $v = 1, 2, \dots, N$ представляет искомое распределение отражательной характеристики по зоне ответственности в дискретизированной форме.

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} t_{zi}(\mathbf{r}_v) &= \tau_{iv}, \quad \varphi(t - \tau_{iv}) = \varphi_{iv}(t), \\ F_{изл}(\mathbf{r}_v) F_{при}(\mathbf{r}_v) &= F_{iv}, \quad f(\mathbf{r}_v) = f_v, \end{aligned} \tag{5}$$

где i — номер датчика; τ_{iv} — время распространения сигнала по трассе от источника до v -го ЭР и от него до i -го датчика; $\varphi_{iv}(t)$ — сигнал, принимаемый i -м датчиком от v -го ЭР; F_{iv} — коэффициент направленности системы при передаче сигнала по трассе источник — v -й ЭР — i -й датчик; f_v — удельная ЭПР v -го ЭР.

Подставив введенные обозначения (5) в (4), получим уравнение измерения i -го датчика:

$$g_i(t) \approx \sum_{v=1}^N F_{iv}f_v\varphi_{iv}(t) = \mathbf{h}_i^T(t)\mathbf{f}, \tag{6}$$

где $\mathbf{h}_i(t) = [F_{i1}\varphi_{i1}(t) F_{i2}\varphi_{i2}(t) \dots F_{iN}\varphi_{iN}(t)]^T$ — весовой вектор; $\mathbf{f} = [f_1 f_2 \dots f_N]^T$ — вектор отражательных характеристик (искомый вектор-оригинал).

Запишем уравнение (6) для всех датчиков. С учетом ошибок измерений эти уравнения принимают вид системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)

$$\begin{cases} g_1(t) = \mathbf{h}_1^T(t)\mathbf{f} + n_1(t), \\ g_2(t) = \mathbf{h}_2^T(t)\mathbf{f} + n_2(t), \\ \dots \\ g_M(t) = \mathbf{h}_M^T(t)\mathbf{f} + n_M(t), \end{cases} \tag{7}$$

где $n_i(t)$ — ошибки измерений i -го датчика.

СЛАУ (7) перепишем в виде векторно-матричного уравнения отображения:

$$\mathbf{g}(t) = \mathbf{H}^T(t)\mathbf{f} + \mathbf{n}(t), \tag{8}$$

где $\mathbf{H}^T(t) = [\mathbf{h}_1(t) \vdots \mathbf{h}_2(t) \vdots \dots \vdots \mathbf{h}_M(t)]^T$ — матрица отображения; $\mathbf{g}(t) = [g_1(t) \ g_2(t) \ \dots \ g_M(t)]^T$ — вектор измерений (вектор-отображение); $\mathbf{n}(t) = [n_1(t) \ n_2(t) \ \dots \ n_M(t)]^T$ — вектор ошибок измерений.

Матрица отображения известна: она определяется зондирующим сигналом и положениями приемных датчиков. Полученное уравнение отображения (8) позволяет оценить входящий в него вектор-оригинал \mathbf{f} по измеренному вектору-отображению \mathbf{g} .

2. Оценивание по уравнению отображения

Рассмотрим два метода оценивания вектора отражательных характеристик — метод псевдообращения, который является методом решения СЛАУ без учета ошибок измерений, и разработанный профессором В.И. Самойленко метод оценивания по принципу корреляционной обработки.

2.1. Метод псевдообращения

Формула решения СЛАУ (8) без учета ошибок измерений определяется матрицей отображения $\mathbf{H}^T(t)$. В наиболее общем виде решение методом псевдообращения [15] можно записать в виде уравнения

$$\widehat{\mathbf{f}}_{\text{пс}}(t) = [\mathbf{H}^T(t)]^+ \mathbf{g}(t), \quad (9)$$

где индекс «+» обозначает операцию псевдообращения матрицы.

Заметим, что оценка (9) зависит от момента измерений. При этом необходимо провести замеры мгновенных значений сигналов, получаемых датчиками в фиксированный момент t . Учитывая невозможность применения гетеродинамирования, произвести такие измерения сложно. Кроме того, метод псевдообращения оказывается неустойчивым к влиянию искажающих факторов или размерности матрицы отображения, как

Слагаемые в правой части (11) определяются выражением

$$\overline{\mathbf{h}_i(t)\mathbf{h}_i^T(t)} = \begin{bmatrix} F_{i1}F_{i1}\overline{\varphi(t-\tau_{i1})\varphi(t-\tau_{i1})} & F_{i1}F_{i2}\overline{\varphi(t-\tau_{i1})\varphi(t-\tau_{i2})} & \dots \\ F_{i2}F_{i1}\overline{\varphi(t-\tau_{i2})\varphi(t-\tau_{i1})} & F_{i2}F_{i2}\overline{\varphi(t-\tau_{i2})\varphi(t-\tau_{i2})} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Если сигнал достаточно широкополосный, чтобы к нему было применимо условие стационарности, то выражение (12) представимо в виде:

$$\overline{\mathbf{h}_i(t)\mathbf{h}_i^T(t)} = \begin{bmatrix} F_{i1}F_{i1}\rho(0) & F_{i1}F_{i2}\rho(\tau_{i1}-\tau_{i2}) & \dots & F_{i1}F_{iN}\rho(\tau_{i1}-\tau_{iN}) \\ F_{i2}F_{i1}\rho(\tau_{i2}-\tau_{i1}) & F_{i2}F_{i2}\rho(0) & \dots & F_{i2}F_{iN}\rho(\tau_{i2}-\tau_{iN}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{iN}F_{i1}\rho(\tau_{iN}-\tau_{i1}) & F_{iN}F_{i2}\rho(\tau_{iN}-\tau_{i2}) & \dots & F_{iN}F_{iN}\rho(0) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где $\rho(\tau) = \overline{\varphi(t)\varphi(t+\tau)}$ — ковариационная функция стационарного зондирующего сигнала.

Формулы (12), (13) дают возможность определить матрицу $\mathbf{H}(t)\mathbf{H}^T(t)$. Для стационарного СШП процесса эта матрица, согласно (11), равна сумме матриц (13), вычисленных для всех M датчиков. При числе измерителей, не меньшем числа ЭР и правильном их расположении в пространстве, эта матрица — квадратная невырожденная и имеет обратную $(\mathbf{H}(t)\mathbf{H}^T(t))^{-1}$.

Оценка вектора отражательных характеристик определяется из (10) согласно уравнению

$$\widehat{\mathbf{f}}_{\text{коп}} = (\mathbf{H}(t)\mathbf{H}^T(t))^{-1} \overline{\mathbf{H}(t)\mathbf{g}(t)} = \mathbf{Q}\mathbf{e}. \quad (14)$$

это будет видно далее по результатам компьютерных экспериментов.

Альтернативный вариант оценивания разработал профессор В.И. Самойленко. Это корреляционный метод оценивания, применимый для непрерывного (квазинепрерывного) случайного (квазислучайного) зондирующего сигнала.

2.2. Корреляционный метод оценивания

Умножим (8) слева на $\mathbf{H}(t)$ и усредним:

$$\overline{\mathbf{H}(t)\mathbf{g}(t)} = \overline{\mathbf{H}(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{f}} + \overline{\mathbf{H}(t)\mathbf{n}(t)}, \quad (10)$$

где надчеркивание обозначает усреднение.

Второе слагаемое в правой части (10) равно нулю. Действительно, структура матрицы $\mathbf{H}(t)$ имеет вид

$$\mathbf{H}(t) = \begin{bmatrix} F_{11}\varphi_{11}(t) & F_{21}\varphi_{21}(t) & \dots & F_{M1}\varphi_{M1}(t) \\ F_{12}\varphi_{12}(t) & F_{22}\varphi_{22}(t) & \dots & F_{M2}\varphi_{M2}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{1N}\varphi_{1N}(t) & F_{2N}\varphi_{2N}(t) & \dots & F_{MN}\varphi_{MN}(t) \end{bmatrix},$$

из чего следует, что вектор $\overline{\mathbf{H}(t)\mathbf{n}(t)} = 0$, поскольку ошибки измерений датчиков не коррелированы с зондирующим сигналом: $\overline{\varphi_{ij}(t)n_i(t)} = 0$.

Определим теперь структуру произведения $\overline{\mathbf{H}(t)\mathbf{H}^T(t)}$, входящего в первое слагаемое правой части (10). Учитывая, что $\mathbf{H}(t) = [\mathbf{h}_1(t) \mid \mathbf{h}_2(t) \mid \dots \mid \mathbf{h}_M(t)]$, получаем:

$$\overline{\mathbf{H}(t)\mathbf{H}^T(t)} = \sum_{i=1}^M \overline{\mathbf{h}_i(t)\mathbf{h}_i^T(t)}. \quad (11)$$

В выражении (14) $\mathbf{Q} = (\overline{\mathbf{H}(t)\mathbf{H}^T(t)})^{-1}$. В более общем случае, если матрица $\overline{\mathbf{H}(t)\mathbf{H}^T(t)}$ не имеет обратной, матрицу \mathbf{Q} можно найти с помощью операции псевдообращения:

$$\mathbf{Q} = (\overline{\mathbf{H}(t)\mathbf{H}^T(t)})^+.$$

Матрица \mathbf{Q} известна: согласно (13), она определяется ковариационной функцией известного зондирующего сигнала и направленными свойствами приема-передающих систем, которые тоже известны.

Определим входящий в правую часть (14) вектор \mathbf{e} :

$$\begin{aligned}
 \mathbf{e} &= \overline{\mathbf{H}(t)\mathbf{g}(t)} = \sum_{i=1}^M \overline{\mathbf{h}_i(t)g_i(t)} = \\
 &= \sum_{i=1}^M \begin{bmatrix} F_{i1}\overline{\varphi(t-\tau_{i1})g_i(t)} \\ F_{i2}\overline{\varphi(t-\tau_{i2})g_i(t)} \\ \vdots \\ F_{iN}\overline{\varphi(t-\tau_{iN})g_i(t)} \end{bmatrix} \quad (15)
 \end{aligned}$$

Согласно (15), вектор \mathbf{e} определяется взаимными ковариационными функциями принимаемых датчиками сигналов и зондирующего сигнала с учетом его задержек распространения. Обобщенная функциональная блок-схема оценщика по формуле (14) показана на рис. 2.

На схеме (рис. 2) собственно корреляционная обработка осуществляется в соответствии с (15); блок интегрирования выполняет операцию усреднения. Получаемый в результате корреляционной обработки вектор \mathbf{e} умножается, согласно (14), на матрицу \mathbf{Q} . В результате на выходе получаем оценку вектора отражательных характеристик.

Заметим, что матрица \mathbf{Q} может быть вычислена априори. Измерения датчиков используются только в блоке корреляционной обработки для формирования вектора \mathbf{e} . Поскольку корреляционная обработка включает усреднение, она не требует прямых мгновенных измерений показаний датчиков и может быть реализована в аналоговом варианте с последующей оцифровкой компонент вектора \mathbf{e} и умножением этого вектора на заранее сформированную матрицу \mathbf{Q} . При этом происходит нивелирование влияния ошибок измерений, что было обосновано выше.

Компьютерные эксперименты

Целью компьютерных экспериментов является анализ потенциальных возможностей метода оценивания плотности распределения ЭПР в зоне ответственности с использованием квазинепрерывного СШП зондирующего сигнала. Эксперименты проводились в среде MATLAB.

В качестве зондирующего сигнала используется многочастотный СШП сигнал с гармоническими составляющими, лежащими в диапазоне частот 1–10 ГГц. Форма такого сигнала показана на рис. 3.

В экспериментах источник сигнала и приемные датчики — всенаправленные. В этом случае значения

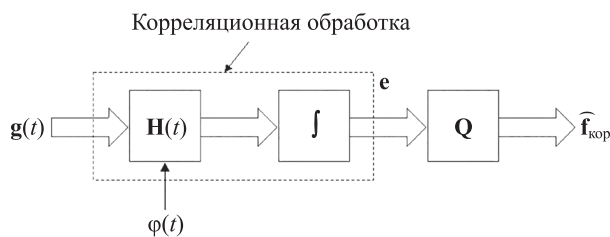


Рис. 2. Обобщенная функциональная блок-схема корреляционного оценивания вектора отражательных характеристик; блок со знаком интеграла «∫» выполняет усреднение

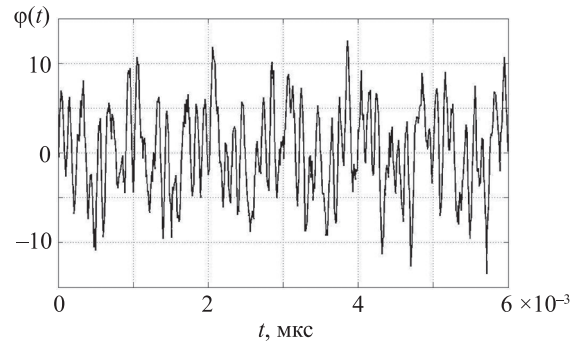


Рис. 3. Зондирующий сигнал φ(t)

всех коэффициентов направленности равны единице: $F_{iN} = 1$. Геометрия экспериментов показана на рис. 4. Во всех экспериментах используется одно и то же число датчиков $M = 12$; положение их соответствует рис. 4.

Решить задачу оценивания вектора отражательных характеристик можно методом псевдообращения (9) или разработанным профессором В.И. Самойленко корреляционным методом (14).

Однако метод псевдообращения работает по одномоментному измерению, в то время как корреляционный метод включает процедуру интегрирования на некотором временном интервале. Получается, что в методе псевдообращения используется меньше измеряемых данных, чем в корреляционном методе. Чтобы уравнивать методы в этом смысле, добавим такой вариант метода псевдообращения, как псевдообращение с усреднением по множеству последовательных оцениваний. Таким образом, будем рассматривать три варианта решения задачи — метод псевдообращения, метод псевдообращения с усреднением и корреляционный метод. Для количественной оценки результатов используем норму разности между оценкой вектора отражательных характеристик и истинным его значением:

$$d = \|\hat{\mathbf{f}} - \mathbf{f}\| \quad (16)$$



Рис. 4. Геометрия эксперимента

Во всех экспериментах в зоне ответственности находятся четыре отражающих ЭР с коэффициентами отражения 0,1; 0,2; 0,3 и 0,15.

Результаты первого эксперимента представлены на рис. 5, где тонкими линиями показаны истинные значения отражательных характеристик ЭР.

В этом эксперименте число ЭР в зоне ответственности $N = 12$, т. е. число приемных датчиков и ЭР одинаковое; размер ЭР составляет $3 \times 3 \times 3 \text{ м}^2$. Ошибки измерений отсутствуют, зондирующий сигнал — точно известный.

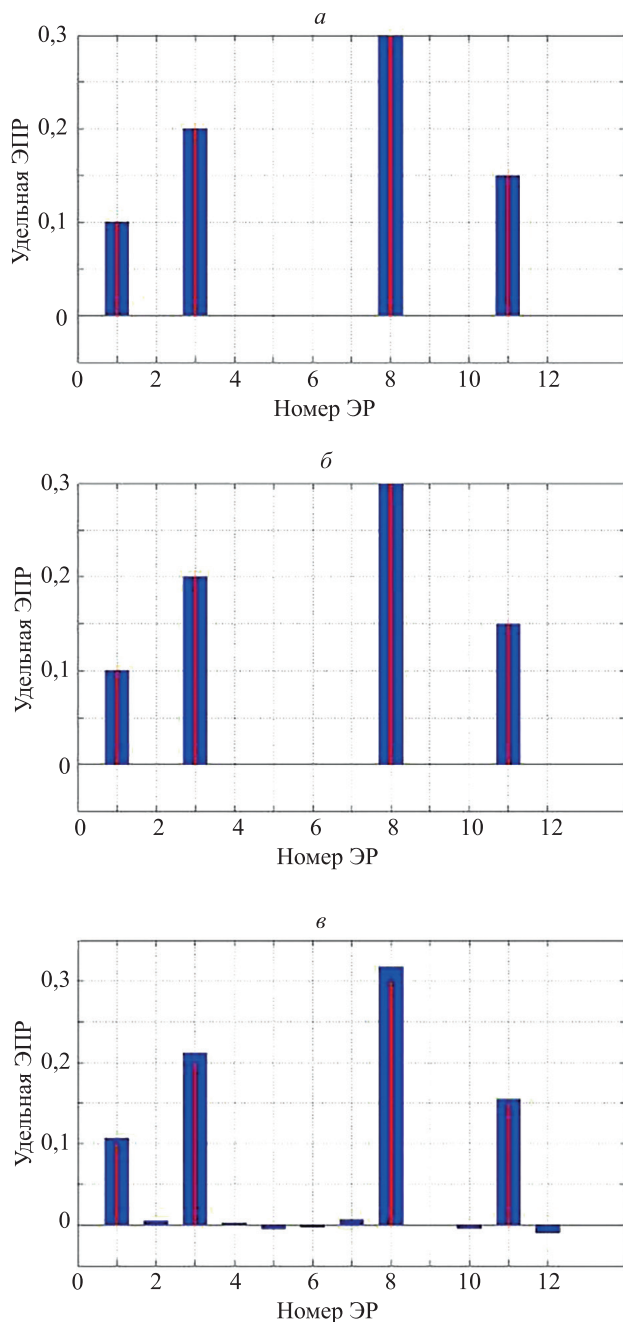


Рис. 5. Восстановленные отражательные характеристики элементов разрешения в отсутствие ошибок измерений и флуктуаций сигнала при числе элементов разрешения $N = 12$: методом псевдообращения (а); усредненным методом псевдообращения (б); новым корреляционным методом (в)

Количественные характеристики (16) точности восстановления в этом случае следующие: для метода псевдообращения $d_{\text{пс}} = 4,2670 \cdot 10^{-16}$, для метода псевдообращения с усреднением $d_{\text{пс уср}} = 3,6281 \cdot 10^{-14}$, для корреляционного метода $d_{\text{кор}} = 0,0299$. Как видно из рис. 5 и количественных оценок, наилучший результат получился методом псевдообращения, а наименее точный — корреляционным методом. Однако все три метода обеспечивают уверенное решение задачи.

Во втором эксперименте при тех же идеализированных условиях уменьшены размеры ЭР; теперь они составляют $1,5 \times 1,5 \times 1,5 \text{ м}^3$, а число их $N = 96$. На рис. 6

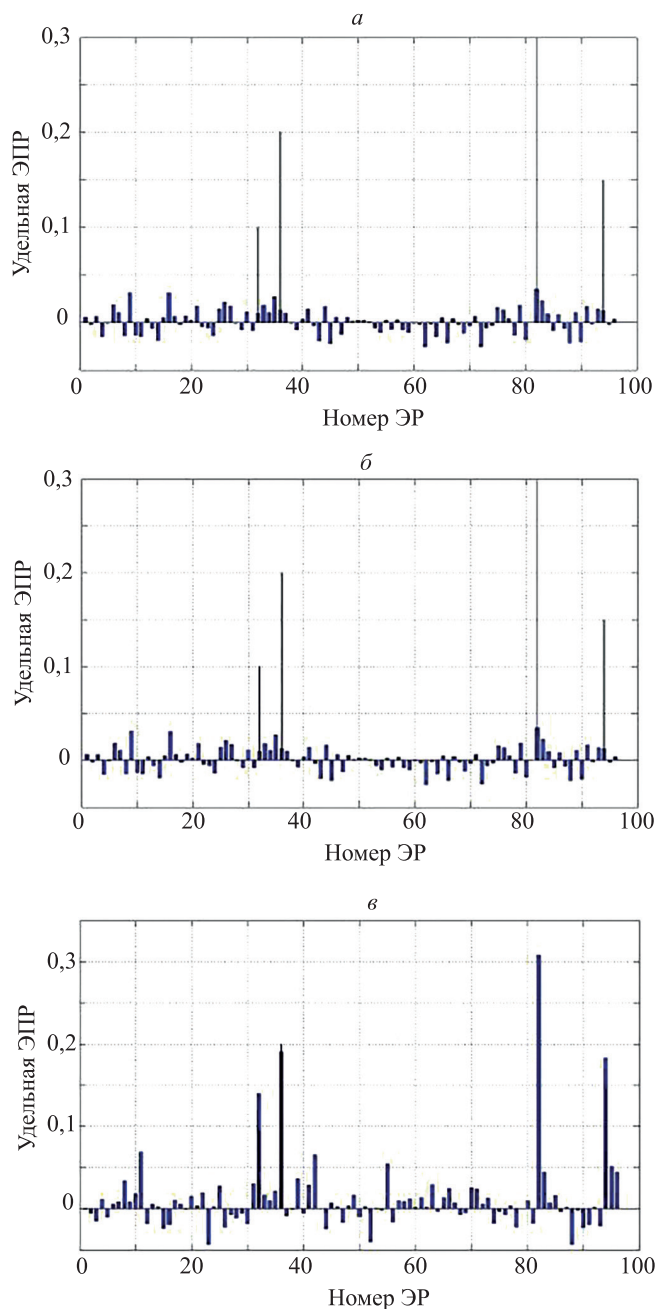


Рис. 6. Восстановленные отражательные характеристики элементов разрешения в отсутствие ошибок измерений и флуктуаций сигнала при числе элементов разрешения $N = 6$: методом псевдообращения (а); усредненным методом псевдообращения (б); новым корреляционным методом (в)

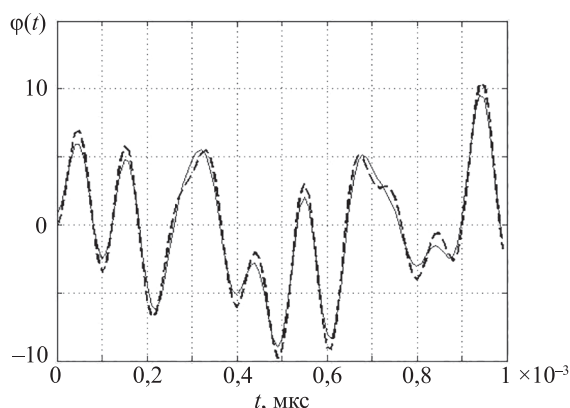


Рис. 7. Идеальный сигнал источника (пунктирная линия) и излучаемый зондирующий сигнал с искажениями (тонкая сплошная линия)

показаны результаты оценивания. Тонкими линиями показаны истинные отражательные характеристики ЭР.

Количественные оценки по формуле (16) составляют: для метода псевдообращения $d_{\text{пс}} = 0,3796$; для метода псевдообращения с усреднением $d_{\text{пс уср}} = 0,3805$; для корреляционного метода $d_{\text{кор}} = 0,3723$.

Из рис. 6 видно, что, несмотря на близкие значения количественных оценок, наилучшее оценивание обеспечивает корреляционный метод. Только корреляционный метод позволяет выявить отражающие ЭР и оценить значения их удельных ЭПР, в то время как оба метода псевдообращения оказались неработоспособными.

В третьем эксперименте присутствуют незначительные искажения зондирующего сигнала по сравнению с идеальным расчетным сигналом; ошибки измерений отсутствуют. Фрагмент сигналов (идеального и излучаемого) показан на рис. 7.

Расчетные матрицы $\mathbf{H}(t)$ в методах псевдообращения и матрица \mathbf{Q} в корреляционном методе вычисляются по идеальному сигналу, в то время как измерения формируются излучаемым сигналом с искажениями. Число ЭР принято таким же, как в первом эксперименте — $N = 12$. Результаты восстановления приведены на рис. 8, где тонкими линиями показаны истинные значения компонент вектора \mathbf{f} .

Количественные оценки по формуле (16) составляют: для метода псевдообращения $d_{\text{пс}} = 5,4862$, для метода псевдообращения с усреднением $d_{\text{пс уср}} = 5,2928$, для корреляционного метода $d_{\text{кор}} = 0,0368$.

Как видно из рис. 8 и количественных результатов восстановления, только корреляционный метод сохраняет работоспособность в условиях флуктуаций зондирующего сигнала.

Ввиду ограниченного объема статьи результаты экспериментов с ошибками измерений не приведены, однако и при наличии этих ошибок корреляционный метод оценивания остается работоспособным, а оба метода псевдообращения — нет.

Заметим, что предложенный метод накладывает определенные требования на источник излучения: его ДН должна быть достаточно широкой, чтобы перекрывать всю зону ответственности. Кроме этого, предпола-

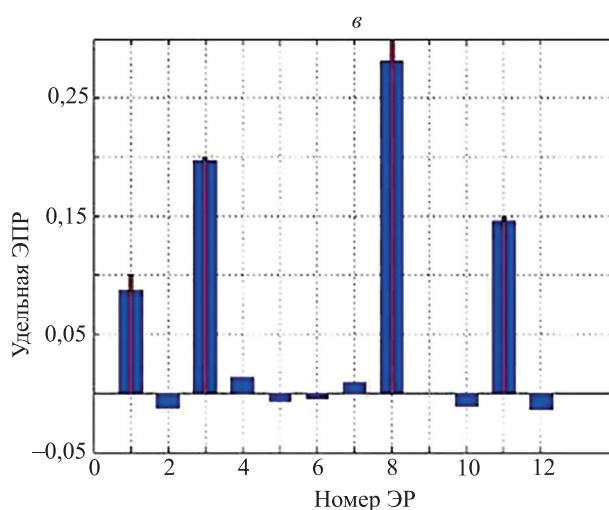
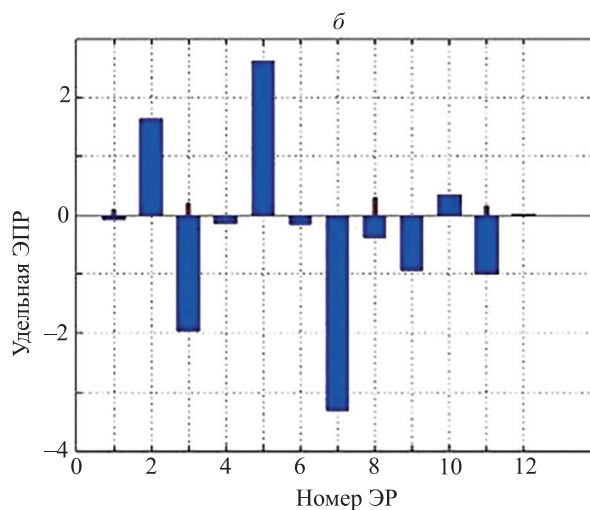
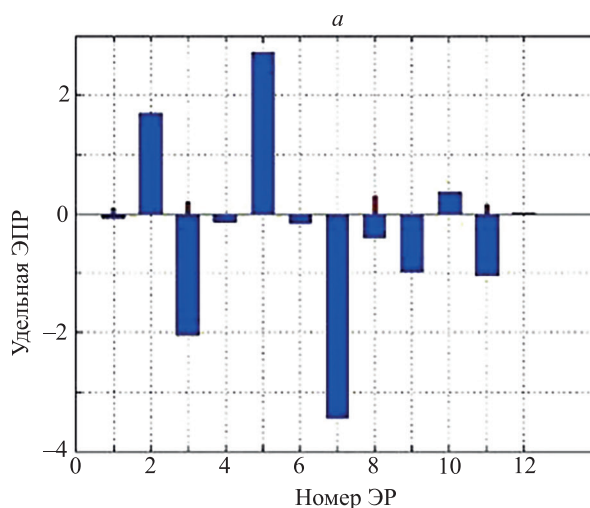


Рис. 8. Восстановленные отражательные характеристики элементов разрешения при наличии флуктуаций сигнала: методом псевдообращения (а); усредненным методом псевдообращения (б); новым корреляционным методом (в) (тонкими линиями показано истинное распределение отражательных характеристик)

гается, что отражающие ЭР не обладают резонансными отражательными свойствами в диапазоне зондирующего сигнала.

Заключение

В работе представлен метод оценивания распределения плотности отражательных характеристик по зоне ответственности, включая новый корреляционный метод. Приведено математическое изложение метода и результаты его применения, полученные в компьютерных экспериментах.

В экспериментах оценивание отражательных характеристик проводилось тремя методами — псевдообращения, псевдообращения с усреднением и корреляционным методом. Эксперименты продемонстрировали существенные преимущества корреляционного метода. Только этот метод остается работоспособным и позволяет с хорошей точностью оценивать как положения,

так и значения удельных эффективных поверхностей рассеяния отражающих элементов разрешения при уменьшении размеров и увеличении количества элементов разрешения в зоне ответственности или при искажениях зондирующего сигнала. Метод псевдообращения и метод псевдообращения с усреднением в этих условиях неработоспособны: они дают ошибочные результаты, не позволяя выявить отражающие элементы разрешения. Дополнительным важным преимуществом корреляционного метода является то, что он проще реализуем, поскольку работает с усредненными сигналами, в то время как методы псевдообращения требуют точных мгновенных измерений сигналов всех датчиков.

Литература

1. Радзиевский В.Г., Трифонов П.А. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. М.: Радиотехника, 2009. 288 с.
2. Зайцев А.В., Битаев Е.С., Амозов Е.В., Романчук А.С. Методика синтеза сверхширокополосной линейной печатной антенной решетки с диаграммой направленности заданной формы // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2014. № 1(29). С. 36–45.
3. Баум К.Э. Новые методы нестационарного (широкополосного) анализа и синтеза антенн и рассеивателей // ТИИЭР. 1976. Т. 64. № 11. С. 53–74.
4. Костылев А.А. Идентификация радиолокационных целей при использовании сверхширокополосных сигналов: методы и приложения // Зарубежная радиоэлектроника. 1984. № 4. С. 75–102.
5. Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Коновалюк М.А. Определение параметров многоточечных целей по спектру радиолокационного изображения // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 3. С. 193–198.
6. Нечаев С.С., Анисимов С.Ю. Особенности функционирования комплексов подповерхностного обнаружения объектов с помощью сверхширокополосных сигналов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2013. № 1(4). С. 289–294.
7. Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. 2. Методы анализа и применение // Радиофизика и радиоастрономия. 2008. Т. 13. № 4. С. 270–322.
8. Астанин Л.Ю., Костылев А.А. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. М.: Радио и связь, 1989. 192 с.
9. Залогин Н.Н., Калинин В.И., Скнарья А.В. Активная локация с использованием широкополосных хаотических сигналов // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2011. Т. 3. № 1. С. 3–17.
10. Скнарья А.В., Разин А.А., Тошов С.А., Демидов А.И. Сверхширокополосные зондирующие сигналы в гидроакустических системах // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2018. Т. 10. № 2. С. 209–212. doi: 10.17725/rensit.2018.10.209
11. Гречаник К.А., Докучаев В.Н., Исько Ф.Ф., Ханов В.Х. Обработка сверхширокополосных сигналов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2010. Т. 1. № 6. С. 155–156.
12. Шишанов С.В., Мьякинков А.В. Система кругового обзора для транспортных средств на основе сверхширокополосных датчиков // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2015. № 2. С. 55–60.
13. Самойленко М.В. Томография и аэрокосмические антенные системы. М.: Издательство МАИ, 2011. 148 с.
14. Самойленко М.В. Обработка сигналов в задачах локационных измерений и оценивания. М.: Издательский дом «Спектр», 2016. 260 с.
15. Самойленко М.В. Способ определения отражательных характеристик и координат элементов объема протяженного объекта при его сверхширокополосном зондировании. Патент RU 2482510. Бюл. 2013. № 14.

References

1. Radzievskii V.G., Trifonov P.A. *Ultra-Wide Band Signal and Interference Processing*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2009, 288 p. (in Russian)
2. Zaytsev A.V., Bitayev E.S., Amozov E.V., Romanchuk A.S. Technique of synthesis of uwb linear printing antenna lattice with directional pattern of the set form. *University proceedings. Volga region. Technical sciences*, 2014, no. 1(29), pp. 36–45. (in Russian)
3. Baum K.E. New methods of non-stationary (broadband) analysis and synthesis of antennas and scatterers. *IEEE Transactions*, 1976, vol. 64, no. 11, pp. 53–74. (in Russian)
4. Kostylev A.A. Identification of radar targets applying ultra-wideband signals: methods and applications. *Zarubezhnaya radioelektronika*, 1984, vol. 4, pp. 75–102. (in Russian)
5. Kuznetsov Y.V., Baev A.B., Konovaluk M.A. Multi-point scatterer target identification using radar image spectrum. *Aerospace MAI Journal*, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 193–198. (in Russian)
6. Nechaev S.S., Anisimov S.Iu. Operation features of subsurface object detection complexes applying ultra-wideband signals. *Pozharnaya Bezopasnost': Problemy i Perspektivy*, 2013, no. 1(4), pp. 289–294. (in Russian)
7. Lazorenko O.V., Chernogor L.F. The Ultrawideband Signals and Physical Processes. 2. Analysis Methods and Application. *Radio Physics and Radio Astronomy*, 2008, vol. 13, no. 4, pp. 270–322. (in Russian)
8. Astanin L.Iu., Kostylev A.A. *Fundamentals of Ultra-Wideband Radar Measurements*. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1989, 192 p. (in Russian)
9. Zalogin N.N., Kalinin V.I., Sknarya A.V. The active location with the use of ultrawide-band chaotic signals. *Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2011, vol. 3, no. 1, pp. 3–17. (in Russian)
10. Sknarya A.V., Razin A.A., Toshchov S.A., Demidov A.I. Ultra wideband sounding signals in hydroacoustic systems. *Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 209–212. (in Russian). doi: 10.17725/rensit.2018.10.209
11. Grechanik K.A., Dokuchaev V.N., Isko F.F., Khanov V.Kh. Ultra-wide band signal processing. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 2010, vol. 1, no. 6, pp. 155–156. (in Russian)
12. Shishanov S.V., Myakinkov A.V. The system of the circular review for vehicles based on ultra-wideband sensors. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2015, no. 2, pp. 55–60. (in Russian)
13. Samoilenko M.V. *Tomography and Aerospace Antenna Systems*. Moscow, MAI Publ., 2011, 148 p. (in Russian)
14. Samoilenko M.V. *Signal Processing in Problems of Location Measurements and Estimation*. Moscow, Spectr Publ., 2016, 260 p. (in Russian)
15. Samojlenko M.V. Method of determining reflection characteristics and coordinates of volume elements of extended object during ultra-wideband probing thereof. *Patent RU 2482510*, 2013. (in Russian)

Автор

Самойленко Марина Витальевна — кандидат технических наук, доцент, доцент, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, 125080, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-4798-2414, Samoi.Mar@mail.ru

Author

Marina V. Samoilenko — PhD, Associate Professor, Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125080, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-4798-2414, Samoi.Mar@mail.ru