

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-303-309

УДК 621.391

## Короткоимпульсный сверхширокополосный зондирующий сигнал в задаче оценивания отражательных характеристик

Марина Витальевна Самойленко<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, 125080, Российская Федерация

<sup>1</sup> [Samoi.Mar@mail.ru](mailto:Samoi.Mar@mail.ru)✉, <https://orcid.org/0000-0002-4798-2414>

### Аннотация

**Предмет исследования.** Разработан метод обработки когерентных короткоимпульсных сверхширокополосных сигналов, отраженных от некоторой зоны ответственности, который позволяет оценить распределение отражательных характеристик по этой зоне. Для реализации метода используется множество приемных датчиков интегрального типа и один источник зондирующих когерентных короткоимпульсных сверхширокополосных сигналов, облучающий зону ответственности. **Метод.** Решение задачи оценивания распределения отражательных характеристик по зоне ответственности строится на принципах многоканальной томографии. Основу этого подхода составляет формирование уравнения отображения и дальнейшее его решение. Существенным фактором, влияющим на решение данной задачи, является нестационарность зондирующего сигнала. С учетом этого фактора разработан метод формирования расширенного уравнения отображения, которое позволяет оценивать распределение отражательных характеристик при использовании нестационарных зондирующих сигналов.

**Основные результаты.** Исследованы три метода оценивания распределения отражательных характеристик по формируемому расширенному уравнению отображения: винеровское оценивание, метод псевдообращения и матрично-итерационный метод. В ходе компьютерных экспериментов получены зависимости ошибок оценивания от ошибок измерений при различной степени заполненности зоны ответственности отражающими элементами. Наилучшие результаты показал метод винеровского оценивания и матрично-итерационный метод. Разработанная математическая модель распространения зондирующего сигнала отображает эффект изменения формы зондирующих импульсов при отражении их от зоны ответственности. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют с помощью нестационарных сверхширокополосных зондирующих сигналов исследовать распределение отражательных характеристик в пространстве.

### Ключевые слова

эффективная поверхность рассеяния, сверхширокополосный короткоимпульсный сигнал, многоканальная томография, винеровское оценивание, метод псевдообращения, матрично-итерационный метод

**Ссылка для цитирования:** Самойленко М.В. Короткоимпульсный сверхширокополосный зондирующий сигнал в задаче оценивания отражательных характеристик // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 2. С. 303–309. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-303-309

## Application of a short-pulse ultra-wideband probing signal for estimating reflective characteristics

Marina V. Samoilenko<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125080, Russian Federation

<sup>1</sup> [Samoi.Mar@mail.ru](mailto:Samoi.Mar@mail.ru)✉, <https://orcid.org/0000-0002-4798-2414>

### Abstract

The paper presents a method developed for processing coherent short-pulse ultra-wideband signals reflected from a certain control zone, which makes it possible to evaluate the distribution of reflective characteristics over this zone. To implement the method, we used a plurality of integral type receiving sensors and one source of probing coherent short-pulse ultra-wideband signals that irradiates the area of responsibility. The solution to estimating the distribution of reflective characteristics over the control zone is based on the principles of multichannel tomography. This approach implies formulating the mapping equation and its further solution. An essential factor influencing the solution to this problem is the nonstationarity of the probing signal. Taking this factor into account, we developed a method derive an extended mapping equation, which allows one to estimate the distribution of reflection characteristics when using non-

stationary probing signals. The work investigated three methods for estimating the distribution of reflective characteristics by the extended mapping equation, namely: Wiener estimation, pseudo-inversion method, and matrix-iterative method. The dependences of estimation errors on measurement errors were obtained in computer experiments for various degrees of filling the control zone with reflective elements. The Wiener estimation and the matrix-iterative method yielded the best results. The developed mathematical model of the propagation of the probing signal shows the effect of changing the shape of the probing pulses when they are reflected from the control zone. The obtained results make it possible to study the distribution of reflective characteristics in space using non-stationary ultra-wideband probing signals.

#### Keywords

radar cross-section (RCS), ultra-wideband short-pulse signal, multichannel tomography, Wiener estimation, pseudo-inverse method, matrix-iterative method

**For citation:** Samoilenko M.V. Application of a short-pulse ultra-wideband probing signal for estimating reflective characteristics. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 303–309 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-303-309

### Введение

Зондирование заданной области пространства — зоны ответственности — сверхширокополосными (СШП) сигналами позволяет обнаруживать малоразмерные объекты, определять форму протяженных объектов, строить трехмерные изображения, решать задачи идентификации и др. Известны различные подходы к решению этих задач. Так, для идентификации может оказаться достаточным оценить размеры и ориентацию объекта при его аппроксимации эллипсоидом [1]. Трехмерное изображение объекта получают по оценкам его поперечных сечений в различных ракурсах [2] или используют для этого преобразования Фурье [3, 4].

Перечисленные задачи можно решить посредством оценивания распределения в пространстве отражательных характеристик, например, эффективной поверхности рассеяния (ЭПР). Один из способов определения этого распределения рассмотрен в настоящей работе.

Ранее в работе [5] был представлен другой метод оценивания распределения ЭПР, основанный на применении стационарного квазинепрерывного СШП сигнала. В продолжение рассмотрения проблемы в данной работе ставится задача найти решение с использованием нестационарного, когерентного короткоимпульсного СШП зондирующего сигнала. Нестационарность сигнала делает невозможным применение предложенного в [5] корреляционного метода оценивания.

Идея представленного далее решения принадлежит доктору технических наук, профессору В.И. Самойленко. В основе предложенного им метода лежат принципы многоканальной томографии [6, 7].

Зондирование пространства короткими СШП импульсами имеет ряд особенностей, обычно усложняющих обработку принимаемых сигналов. Так, в работах [8–10] отмечается изменение формы принимаемого сигнала по сравнению с зондирующими импульсами после их отражения, что препятствует применению традиционных методов обработки, например, согласованной фильтрации. Математический аппарат, разработанный профессором В.И. Самойленко, естественным образом учитывает явление изменения формы зондирующего сигнала при его переотражении, и это изменение не препятствует решению задачи.

Таким образом, цель работы — разработка метода оценивания распределения эффективной поверхности рассеяния по зоне ответственности при облучении ее

когерентным короткоимпульсным СШП сигналом и приеме отраженного излучения множеством датчиков интегрального типа.

Теоретической основой предлагаемого подхода, основанного на принципах многоканальной томографии, являются методы определения подынтегральной функции по множеству измерений интегрального типа, полученных при различных условиях интегрирования. Конкретная реализация связана с решением таких проблем как организация соответствующим образом измерений, дискретизация задачи, математическое описание искомого распределения в виде вектора-оригинала и измерений в виде вектора-отображения, формирование уравнения отображения, определение методов оценивания вектора-оригинала по уравнению отображения. При этом необходимо учитывать специфику зондирующего сигнала и параметры системы измерений, а также априорную информацию.

### Постановка задачи

Используем ту же геометрию задачи, что и в [5]. Зона ответственности облучается зондирующим СШП когерентным короткоимпульсным сигналом  $\varphi(t)$  от источника, расположенного в начале координат. Переотраженное излучение принимается датчиками интегрального типа, положения которых определяются координатными векторами  $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_M$ , где  $M$  — число датчиков. Полагаем известными свойства направленности излучателя и приемных датчиков; обозначим их диаграммы направленности как  $F_{\text{ист}}(\mathbf{r}), F_{D1}(\mathbf{r}), F_{D2}(\mathbf{r}), \dots, F_{DM}(\mathbf{r})$ , где  $\mathbf{r}$  — координатный вектор.

Примем, что зона ответственности представляет собой однородную среду с ограниченным числом неоднородностей, которые не обладают собственным рассеянием в диапазоне зондирующего сигнала, а характеризуются только вынужденным отражением. Полагаем также, что эффектом переотражений между неоднородностями можно пренебречь.

Ставится задача — оценить распределение плотности ЭПР по зоне ответственности. В качестве измеряемых данных используем показания датчиков, которые обозначим как  $g_1(t), g_2(t), \dots, g_M(t)$ .

Решение реализуется в два этапа. На первом этапе задача приводится к расширенному векторно-матричному уравнению отображения; второй этап заключается в решении полученного уравнения.

### Расширенное уравнение отображения

Дискретизируем задачу. Для этого разобьем зону ответственности на объемы малого размера — элементы разрешения (ЭР). Пронумеруем их и зафиксируем координаты центров, которые обозначим как  $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N$ , где  $N$  — число ЭР в зоне ответственности. Заменим искомое распределение плотности ЭПР по зоне ответственности удельными ЭПР всех ЭР, которые обозначим как  $f_1, f_2, \dots, f_N$  и объединим в вектор отражений (вектор-оригинал)  $\mathbf{f} = [f_1 f_2 \dots f_N]^T$ .

В дискретизированном варианте задача состоит в оценивании вектора отражений  $\mathbf{f}$  по измерениям датчиков, которые объединим в вектор измерений (вектор-отображение)  $\mathbf{g}(t) = [g_1(t) g_2(t) \dots g_M(t)]^T$ . Оценив вектор  $\mathbf{f}$ , мы получим искомую оценку распределения плотности ЭПР по зоне ответственности в дискретизированном виде.

Воспользуемся результатами работы [5], где получено уравнение отображения, описывающее зависимость вектора-отображения от вектора-оригинала

$$\mathbf{g}(t) = \mathbf{H}^T(t)\mathbf{f} + \mathbf{n}(t), \quad (1)$$

где  $\mathbf{H}^T(t)$  — матрица отображения;  $\mathbf{n}(t)$  — вектор ошибок измерений;

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

где  $F_{mn} = F_{\text{ист}}(\mathbf{r}_n)F_{Dm}(\mathbf{r}_n)$  — коэффициент направленности системы при передаче сигнала по трассе источник —  $n$ -й ЭР —  $m$ -й датчик;  $\Phi_{mn}(t) = \varphi(t - \tau_{mn})$  — сигнал, принимаемый в момент  $t$   $m$ -м датчиком от  $n$ -го ЭР,  $\tau_{mn} = \frac{\|\mathbf{r}_n\| + \|\mathbf{r}_m - \rho_m\|}{v}$  — время распространения сигнала по трассе от источника до  $n$ -го ЭР и от него до  $m$ -го датчика,  $v$  — скорость распространения сигнала.

Матрица  $\mathbf{H}(t)$  известна: она определяется известным излучаемым сигналом и положениями приемных датчиков и ЭР. Известен, также, вектор измерений  $\mathbf{g}(t)$ . Дальнейшее решение, однако, затрудняется существенной нестационарностью зондирующего сигнала. Это приводит к нестационарности матрицы отображения  $\mathbf{H}^T(t)$  и вектора измерений: в какие-то моменты времени измеряется отраженный сигнал с шумом, а в другие моменты — только шум. Решение по одномоментным измерениям в силу этого обстоятельства невозможно. Однако для любого момента времени  $t_\mu$  верно выражение (1). Запишем его для последовательных моментов:

$$\begin{aligned} \mathbf{g}(t_1) &= \mathbf{H}^T(t_1)\mathbf{f} + \mathbf{n}(t_1), \\ \mathbf{g}(t_2) &= \mathbf{H}^T(t_2)\mathbf{f} + \mathbf{n}(t_2), \\ &\dots \\ \mathbf{g}(t_K) &= \mathbf{H}^T(t_K)\mathbf{f} + \mathbf{n}(t_K). \end{aligned} \quad (2)$$

Перепишем систему векторно-матричных уравнений (2) в виде расширенного векторно-матричного уравнения отображения

$$\mathbf{g}_p = \mathbf{H}_p^T \mathbf{f} + \mathbf{n}_p, \quad (3)$$

где  $\mathbf{g}_p = [\mathbf{g}^T(t_1) | \mathbf{g}^T(t_2) | \dots | \mathbf{g}^T(t_K)]^T$  — расширенный вектор измерений (расширенный вектор-отображение),  $\mathbf{H}_p^T = [\mathbf{H}^T(t_1) | \mathbf{H}^T(t_2) | \dots | \mathbf{H}^T(t_K)]^T$  — расширенная матрица отображения,  $\mathbf{n}_p = [\mathbf{n}^T(t_1) | \mathbf{n}^T(t_2) | \dots | \mathbf{n}^T(t_K)]^T$  — расширенный вектор ошибок измерений.

Расширенное уравнение отображения (3) не содержит временных зависимостей и позволяет получить оценку искомого вектора отражений  $\mathbf{f}$ .

### Решение расширенного уравнения отображения

Возможно применение различных методов оценивания вектора отражений по расширенному уравнению отображения (3). В данной работе рассмотрим три метода: метод псевдообращения [11], винеровское оценивание [12] и матрично-итерационный метод решения системы линейных алгебраических уравнений. Последний метод разработан автором статьи и впервые опубликован в работе [13].

1. Метод псевдообращения дает оценку вектора отражений согласно выражению

$$\hat{\mathbf{f}}_{\text{пс}} = (\mathbf{H}_p^T)^+ \mathbf{g}_p, \quad (4)$$

где индекс «+» обозначает операцию псевдообращения матрицы.

Метод псевдообращения является универсальным, для его реализации не требуется никакой дополнительной информации. Однако оценка (4) не учитывает влияние ошибок измерений даже в том случае, если статистика этих ошибок известна.

2. Винеровское оценивание может применяться, если априори известны ковариационная матрица ошибок измерений  $\mathbf{R}_{\text{нн}} = \overline{\mathbf{n}(t)\mathbf{n}^T(t)}$  и статистика оцениваемого распределения  $\mathbf{R}_{\text{фф}} = \overline{\mathbf{f}(t)\mathbf{f}^T(t)}$ .

Винеровская оценка ищется в классе линейных оценок в виде выражения  $\hat{\mathbf{f}}_{\text{вин}} = \mathbf{W}^T \mathbf{g}_p$ , в котором матрица  $\mathbf{W}$  выбирается так, чтобы средняя квадратическая ошибка оценивания  $\eta = (\mathbf{f} - \hat{\mathbf{f}}_{\text{вин}})^T (\mathbf{f} - \hat{\mathbf{f}}_{\text{вин}}) = (\mathbf{f} - \mathbf{W}^T \mathbf{g}_p)^T (\mathbf{f} - \mathbf{W}^T \mathbf{g}_p)$  была минимальной.

Проведя необходимые преобразования, получим выражение винеровской оценки в явном виде:

$$\hat{\mathbf{f}}_{\text{вин}} = \mathbf{R}_{\text{фф}} \mathbf{H}_p (\mathbf{H}_p^T \mathbf{R}_{\text{фф}} \mathbf{H}_p + \mathbf{R}_{\text{нн}})^{-1} \mathbf{g}_p. \quad (5)$$

Оценка (5) является наилучшей по критерию минимума среднего квадратического отклонения оценки от истинного распределения, однако для ее получения необходимо знание статистических данных.

3. Матрично-итерационный метод является вычислительным. В нем используется информация о минимально возможном, фоновом значении  $\Phi$  искомого величин. В рассматриваемом случае оценивания распределения плотности ЭПР таким фоновым значением будет  $\Phi = 0$ .

На каждой итерации матрично-итерационного метода уравнение отображения решается методом псевдообращения, но само уравнение на каждой итерации изменяется с учетом оценки вектора-оригинала, полученной на предыдущей итерации. Детально этот метод

изложен в работе [13]. Априорные статистические данные в этом методе не используются.

**Компьютерные эксперименты**

Компьютерные эксперименты проведены с целью демонстрации работоспособности предложенного метода оценивания распределения отражательных характеристик при когерентном короткоимпульсном СШП зондирующем сигнале, а также для сравнительного анализа трех описанных выше методов оценивания вектора оригинала по расширенному уравнению отображения.

В экспериментах источник сигналов и приемные датчики предполагаются изотропными, ослабление сигнала не учитывается:  $F_{ист}(\mathbf{r}) \equiv 1, F_{D_i}(\mathbf{r}) \equiv 1, i = 1, 2, \dots, M$ . Ошибки измерений — случайные некоррелированные с нулевым средним и дисперсией  $\sigma_n^2$  (в экспериментах изменяется). Ковариационная матрица таких ошибок измерений равна  $\mathbf{R}_{nn} = \sigma_n^2 \mathbf{I}$ , где  $\mathbf{I}$  — единичная матрица. Зона ответственности представлена в модели кубом размером  $9 \times 6 \times 6 \text{ м}^3$ , разбитым на  $N = 12$  ЭР. Соответственно, вектор отражений имеет размер  $\dim \mathbf{f} = 12 \times 1$ . Отраженные сигналы принимаются 12-ю датчиками:  $M = 12$ .

Среди  $N$  ЭР в зоне ответственности имеется  $L$  отражающих ЭР (ОЭР). Значения их удельных ЭПР равновероятны в диапазоне значений от  $d_1$  до  $d_2$  (в экспериментах

$d_1 = 0,2, d_2 = 0,7$ ). Положения ОЭР в зоне ответственности равновероятны. Анализ и расчеты показали, что для такой модели компоненты ковариационной матрицы оцениваемого распределения

$$\mathbf{R}_{ff} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \dots \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

равны:

$$r_{ii} = L \frac{(N-1)!}{N!} \frac{d_2^3 - d_1^3}{3(d_2 - d_1)},$$

$$r_{ij} = L(L-1) \frac{(N-2)!}{N!} \left( \frac{d_2 - d_1}{2} \right)^2. \quad (6)$$

Формулы (6) использованы при моделировании.

Зондирующий сигнал представляет собой последовательность СШП когерентных импульсов. Частота гармонического заполнения импульса  $f_{зап} = 40 \text{ МГц}$ , длительность импульса  $\tau_{имп} = 50 \text{ нс}$ , период следования импульсов  $T_{имп} = 250 \text{ нс}$ .

Форма зондирующего сигнала при отражении от зоны ответственности изменяется. На рис. 1 показан зондирующий сигнал и сигналы, принимаемые тремя датчиками в отсутствие ошибок измерений.

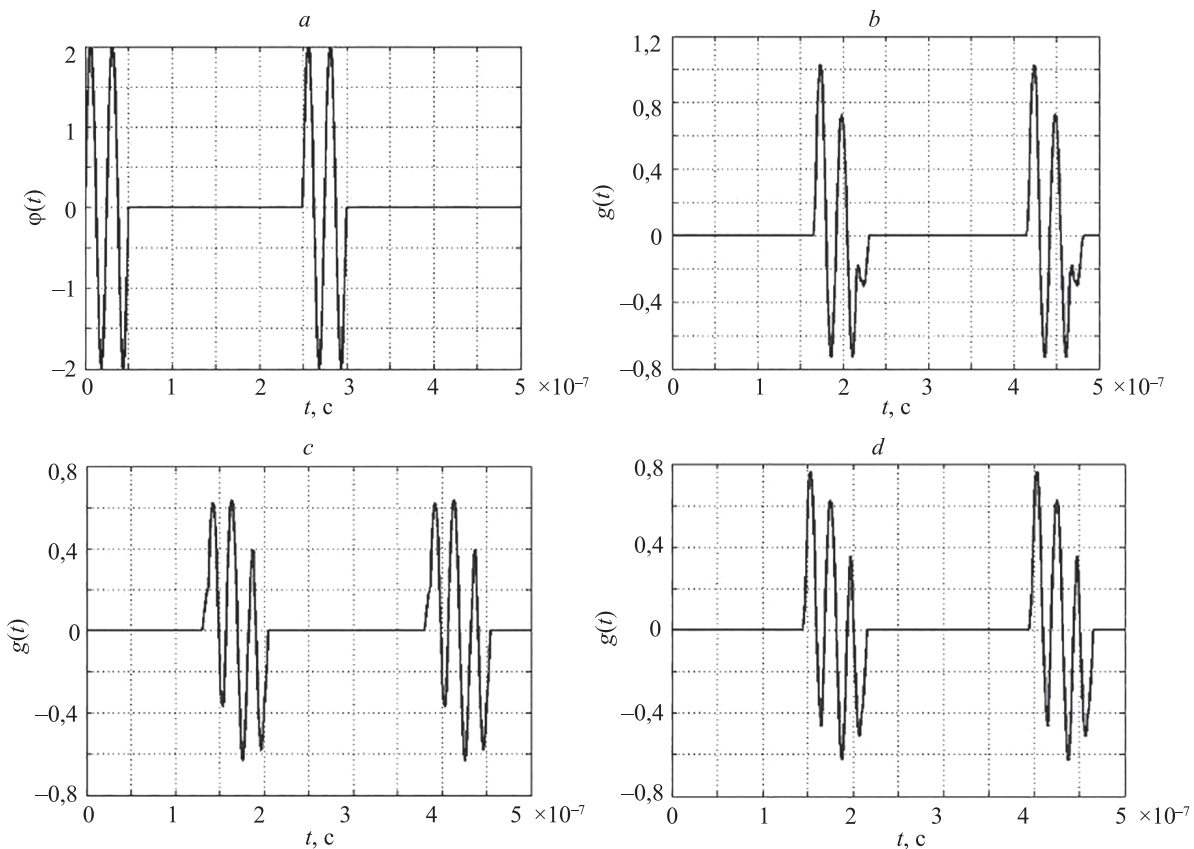


Рис. 1. Зондирующий (a) и принимаемые датчиками сигналы в отсутствие ошибок измерений: 1-й датчик (b); 10-й датчик (c); 12-й датчик (d)

Fig. 1. Probing signal (a) and the signals received by sensors in the absence of measurement errors: 1st sensor (b); 10th sensor (c); 12th sensor (d)



На рисунке видны существенные искажения зондирующего сигнала в точках приема. Однако задача оценивания искомого распределения успешно решается по этим отраженным сигналам даже при наличии ошибок измерений, как это будет видно далее.

На рис. 2 показан сигнал, принимаемый 10-м датчиком при наличии ошибок измерений.

На рис. 3 показаны результаты оценивания вектора отражений при ошибках измерений со средневариационным отклонением  $\sigma_n = 0,3$ . Результаты получены методом Винерского оценивания (рис. 3, а), методом псевдообращения (рис. 3, б) и матрично-итерационным методом (рис. 3, с). Тонкими линиями показано истинное распределение отражательных характеристик по ЭР. Оценки распределения отражательных характеристик, полученные методом Винерского оценивания и методом псевдообращения, предварительно улучшены: отрицательные значения оценок компонент вектора отражений заменены нулями в соответствии с физическим смыслом оцениваемых величин.

Качественно наилучшей представляется оценка матрично-итерационным методом. Для количественного показателя ошибок оценивания используем квадратиче-

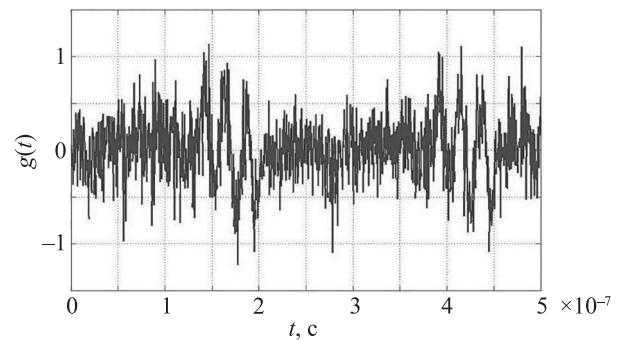


Рис. 2. Сигнал, принимаемый 10-м датчиком при дисперсии ошибок измерений  $\sigma_n^2 = 0,09$  (единиц мощности)

Fig. 2. The signal received by the 10th sensor with the variance of measurement errors  $\sigma_n^2 = 0,09$  (power units)

ское отклонение оценки вектора отражений от истинного его значения, отнесенное к величине  $\mathbf{f}^T \mathbf{f}$ :

$$e = \frac{(\hat{\mathbf{f}} - \mathbf{f})^T (\hat{\mathbf{f}} - \mathbf{f})}{\mathbf{f}^T \mathbf{f}}. \quad (7)$$

Компонентами вектора  $\hat{\mathbf{f}}$  в (7) являются полученные в результате оценивания удельные ЭПР, изображенные

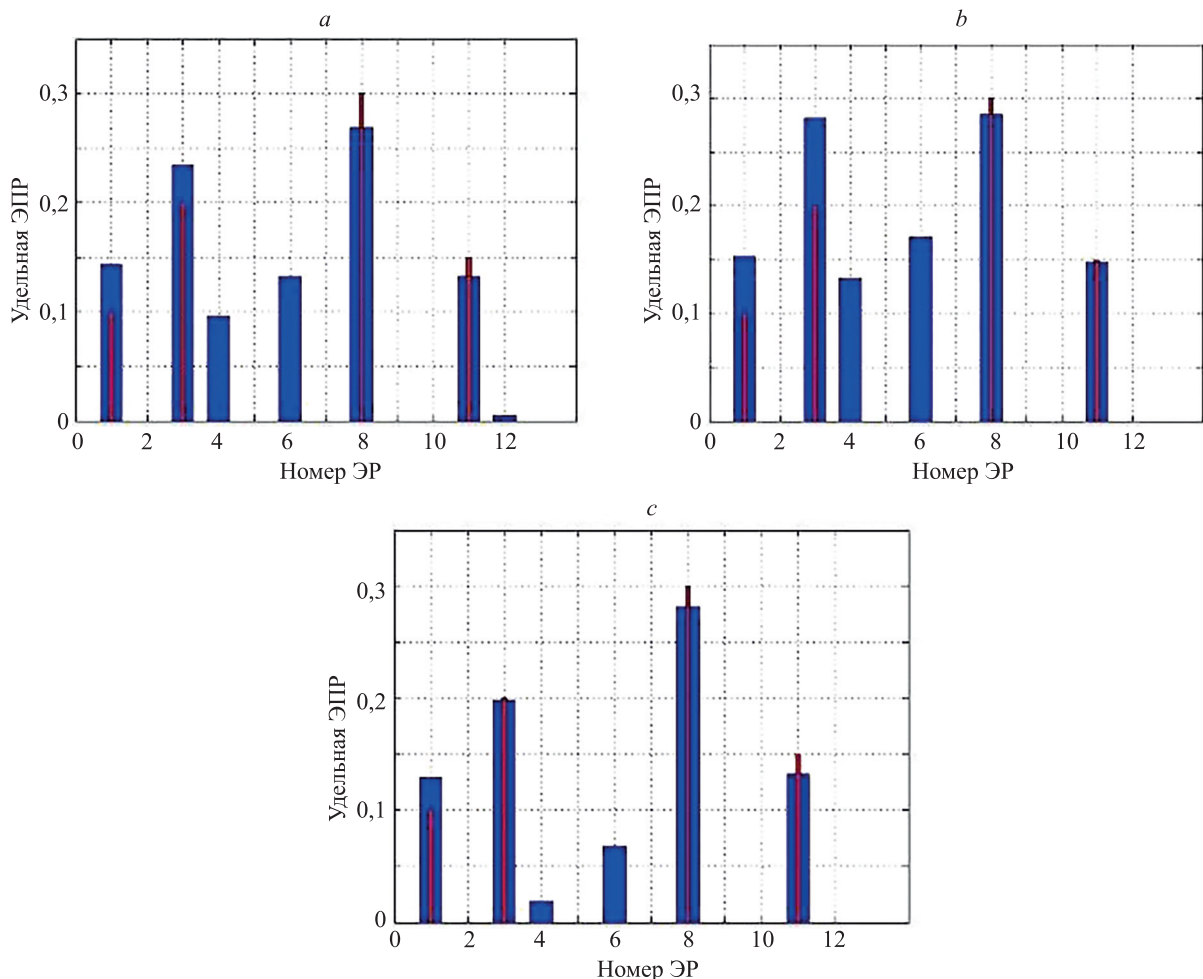


Рис. 3. Результаты оценивания вектора отражений: методом Винерского оценивания (а); методом псевдообращения (б); матрично-итерационным методом (с)

Fig. 3. The results of the estimation of the reflection vector: the Wiener estimation method (a); the pseudo-inversion method (b); the matrix-iterative method (c)

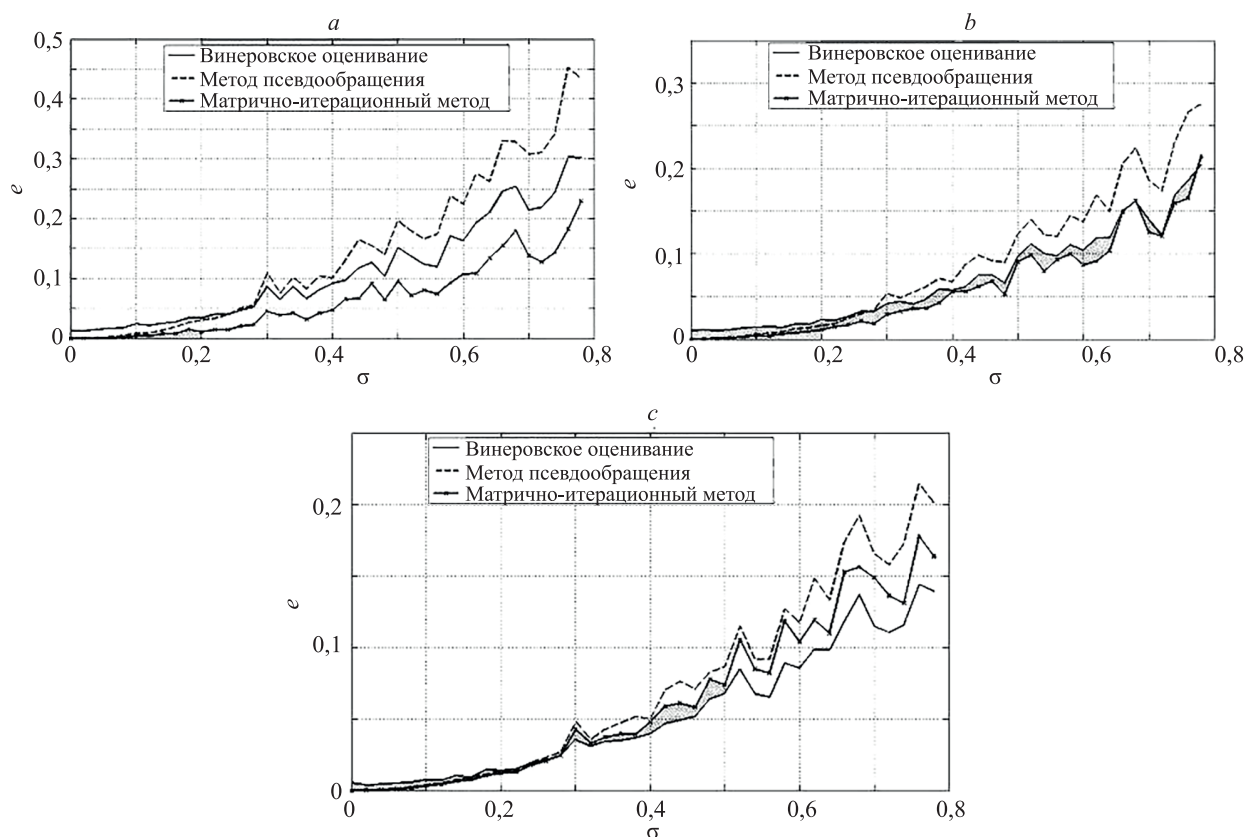


Рис. 4. Зависимость ошибок оценивания вектора отражений от среднеквадратических ошибок измерений при количестве ОЭР:  $L = 4$  (a);  $L = 7$  (b);  $L = 10$  (c)

Fig. 4. Dependence of the reflection vector estimation errors on the rms measurement errors with the number of reflecting resolution elements:  $L = 4$  (a);  $L = 7$  (b);  $L = 10$  (c)

на рис. 3. При этом относительная ошибка (7) составляет: для винеровского оценивания  $e_{\text{вин}} = 0,1927$ ; для метода псевдообращения  $e_{\text{пс}} = 0,3482$ ; для матрично-итерационного метода  $e_{\text{м-и}} = 0,0398$ . Таким образом, по количественным оценкам наиболее точной также оказалась оценка матрично-итерационным методом, а наименее точным оказался метод псевдообращения.

На рис. 4 представлены графики зависимостей ошибок оценивания (7) от среднеквадратических ошибок измерений  $\sigma_n$ . Для каждого значения  $\sigma_n$  ошибки оценивания каждым методом представляют собой усредненные ошибки по 30-и оценкам при различных положениях ОЭР и уровнях удельных ЭПР в принятом диапазоне. Графики получены при разных уровнях заполненности зоны ответственности отражающими ЭР.

Из графиков видно, что, начиная уже с достаточно малых значений ошибок измерений, графики расходятся, и при этом наименее точным оказывается метод псевдообращения. Винеровское оценивание и матрично-итерационный метод могут быть наиболее точными или занимать второе место по точности оценивания в зависимости от числа ОЭР. При  $L = 4$  (рис. 4, a) очевидное преимущество имеет матрично-итерационный метод, при  $L = 7$  (рис. 4, b) эти методы близки по точности, а при  $L = 10$  (рис. 4, c) на первое место выходит винеровское оценивание.

## Заключение

Изложенный в работе метод позволяет посредством временной обработки принимаемых датчиками когерентных короткоимпульсных сверхширокополосных сигналов оценить распределение плотности эффективной поверхности рассеяния по зоне ответственности. Представленное решение на основе принципов многоканальной томографии позволяет успешно обрабатывать принимаемые сигналы несмотря на изменение их формы при отражении.

С учетом нестационарности зондирующих сигналов получено расширенное уравнение отображения, решение которого дает оценку искомого распределения. Компьютерные эксперименты, проведенные при некоторых упрощающих допущениях, позволили сравнить три метода оценивания вектора отражений по расширенному уравнению отображения. Полученные результаты позволяют заключить, что при незначительной заполненности зоны ответственности отражающими элементами разрешения преимущество имеет матрично-итерационный метод, но при большем их числе наиболее точным оказывается винеровское оценивание.

## Литература

1. Костылев А.А. Идентификация радиолокационных целей при использовании сверхширокополосных сигналов: методы и приложения // Зарубежная радиоэлектроника. 1984. № 4. С. 75–102.
2. Moffatt D.L., Young J.D., Ksienski A.A., Lin H.C., Rhoads C.M. Transient response characteristics in identification and imaging // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1981. V. 29. N 2. P. 192–205. doi: 10.1109/TAP.1981.1142584
3. Rockmore A.G., Denton R.V., Friedlander B. Direct three-dimensional image reconstruction // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1979. V. 27. N 2. P. 239–241. doi: 10.1109/TAP.1979.1142051
4. Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Коновалюк М.А. Определение параметров многоточечных целей по спектру радиолокационного изображения // Вестник МАИ. 2010. Т. 17. № 3. С. 193–198.
5. Самойленко М.В. Оценивание 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
6. Самойленко М.В. Томография и аэрокосмические антенные системы. М.: Изд-во МАИ, 2011. 148 с.
7. Самойленко М.В. Обработка сигналов в задачах локационных измерений и оценивания. М.: Издательский дом «Спектр», 2016. 260 с.
8. Нецаев 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.
9. 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.
10. Имморев И.Я. Возможности и особенности сверхширокополосных радиосистем // Прикладная радиоэлектроника. 2002. Т. 1. № 2. С. 122–139.
11. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. 4-е изд., доп. М.: Наука, 1988. 552 с.
12. Самойленко В.И., Пузырев В.А., Грубрин И.В. Техническая кибернетика: учеб. пособие. М.: Изд-во МАИ, 1994. 280 с.
13. Самойленко М.В. Матрично-итерационный метод решения системы линейных уравнений и его применение в томографическом сканировании пространства с использованием радиолокационной станции // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 3. С. 437–446. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-437-446

## Автор

**Самойленко Марина Витальевна** — кандидат технических наук, доцент, доцент, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, 125080, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-4798-2414>, [Samoi.Mar@mail.ru](mailto:Samoi.Mar@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 19.01.2021  
Одобрена после рецензирования 19.02.2021  
Принята к печати 13.03.2021

## References

1. Kostylev A.A. Identification of radar targets applying ultra-wideband signals: methods and applications. *Zarubezhnaja radioelektronika*, 1984, no. 4, pp. 75–102. (in Russian)
2. Moffatt D.L., Young J.D., Ksienski A.A., Lin H.C., Rhoads C.M. Transient response characteristics in identification and imaging. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1981, vol. 29, no. 2, pp. 192–205. doi: 10.1109/TAP.1981.1142584
3. Rockmore A.G., Denton R.V., Friedlander B. Direct three-dimensional image reconstruction. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1979, vol. 27, no. 2, pp. 239–241. doi: 10.1109/TAP.1979.1142051
4. 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)
5. 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
6. Samoilenko M.V. *Tomography and Aerospace Antenna Systems*. Moscow, MAI Publ., 2011, 148 p. (in Russian)
7. Samoilenko M.V. *Signal Processing in Problems of Location Measurements and Estimation*. Moscow, Spectr Publ., 2016, 260 p. (in Russian)
8. Nechaev S.S., Anisimov S.Iu. Operation features of subsurface object detection complexes applying ultra-wideband signals. *Pozharnaja Bezopasnost': Problemy i Perspektivy*, 2013, no. 1(4), pp. 289–294. (in Russian)
9. 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)
10. Immoreev I.Ia. The possibilities and features of ultra-wideband radio systems. *Prikladnaja radioelektronika*, 2002, vol. 1, no. 2, pp. 122–139. (in Russian)
11. Gantmakher F.R. *Matrix Theory*. Moscow, Nauka Publ., 1988, 552 p. (in Russian)
12. Samoilenko V.I., Puzyrev V.A., Grubrin I.V. *Technical Cybernetics*. Moscow, MAI Publ., 1994, 280 p. (in Russian)
13. Samoilenko M.V. Matrix-iterative solution method for system of linear equations and its application in space tomography scanning using radar. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 437–446. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-437-446

## Author

**Marina V. Samoilenko** — PhD, Associate Professor, Associate Professor, доцент, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125080, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-4798-2414>, [Samoi.Mar@mail.ru](mailto:Samoi.Mar@mail.ru)

Received 19.01.2021  
Approved after reviewing 19.02.2021  
Accepted 13.03.2021



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»