

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЙ И МОЩНОСТЕЙ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ОДНОПОЗИЦИОННОЙ ЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИЕЙ

Самойленко М.В., к.т.н., доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), e-mail: [Samoi.Mar@mail.ru](mailto:Samoi.Mar@mail.ru)

**Ключевые слова:** местоположение, источник излучения, приемная антенна, элемент разрешения, отображение, восстановление, псевдообратная матрица.

### Введение

Определение пространственных координат (местоположения) наблюдаемого объекта – источника первичного или вторичного излучения, является классической задачей локации. Достаточно прост способ определения направления на источник излучения по направлению оси диаграммы направленности (ДН), при котором на выходе приемной антенны фиксируется максимальная мощность. Однако для определения местоположения необходимо определить еще и наклонную дальность источника [1]. В активной локации для этого можно использовать дополнительный доплеровский канал. В пассивной локации такой принцип нереализуем. Альтернативный и единственно возможный для пассивной локации метод – это использование двухпозиционных (многопозиционных) локационных систем. Однако организация таких систем не всегда возможна или желательна.

В статье предлагается новый метод определения местоположений источников излучения однопозиционной приемной системой, который позволяет определять одновременно и мощности источников. Метод основан на специальной цифровой обработке измеренной мощности на выходе приемной антенны. Новизна и преимущества метода подтверждены патентом на изобретение [2]. Предлагаемый метод обладает свойством сверхразрешения и может быть использован в системах как активной, так и пассивной локации.

### Постановка задачи

Пусть  $p_{уст}(\mathbf{r})$  – функция, описывающая пространственное распределение мощностей источников излучения, где  $\mathbf{r}$  – координатный вектор. Обозначим ДН приемной антенны по мощности при направляющем векторе ее оси  $\mathbf{e}$  как  $w(\mathbf{r}, \mathbf{e})$ . Тогда мощность на выходе приемной антенны определится выражением

$$p_{вых}(\mathbf{e}) = \int_{\Omega} w(\mathbf{r}, \mathbf{e}) p_{уст}(\mathbf{r}) d\mathbf{r}, \quad (1)$$

где  $\Omega$  – контролируемая область пространства, включающая источники излучения.

Ставится задача восстановить пространственную функцию  $p_{уст}(\mathbf{r})$  по измеренной мощности на выходе

Представлен новый метод, который позволяет определять пространственные координаты и мощности источников излучения по измеренным значениям мощности на выходе однопозиционной приемной антенны посредством специальной цифровой обработки. Приведены математическое изложение метода и результаты компьютерных экспериментов.

приемной антенны  $p_{вых}(\mathbf{e})$ . Восстановленная функция  $\hat{p}_{уст}(\mathbf{r})$  будет определять распределение мощностей излучения по пространству. В идеале при нескольких точечных источниках это будет  $\delta$ -образная функция, выбросы которой характеризуют мощности излучения источников при соответствующим им пространственным координатам  $\mathbf{r}$ .

Восстановление функции, входящей в подынтегральное выражение, по множеству значений интеграла при известной весовой функции  $w(\mathbf{r}, \mathbf{e})$  является задачей многоканальной томографии, основанной на томографическом подходе к обработке сигналов и изложенной в [3].

В терминах томографического подхода  $p_{вых}(\mathbf{e})$  – это элемент интегрального отображения функции-оригинала  $p_{уст}(\mathbf{r})$  при характеристиках системы отображения, описываемых весовой функцией  $w(\mathbf{r}, \mathbf{e})$ . Задача состоит в восстановлении функции-оригинала по совокупности элементов ее отображения.

### Математическое обоснование метода

Разобьем контролируемую область пространства на элементарные объемы – элементы разрешения по местоположению. Пронумеруем их и зафиксируем местоположения координатными векторами  $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_K$ , где  $K$  – число элементов разрешения в контролируемой области пространства. Начало системы координат разместим в точке расположения антенны. Качественно такое разбиение представлено на рис. 1.

Дискретизируем подынтегральное выражение в (1) по элементам разрешения и перейдем к интегральной сумме

$$p_{вых}(\mathbf{e}) = \sum_{k=1}^K w(\mathbf{r}_k, \mathbf{e}) p_{уст}(\mathbf{r}_k) \Delta\Omega,$$

где  $\Delta\Omega$  – размер элемента разрешения, который будем полагать равным единице,  $w(\mathbf{r}_k, \mathbf{e})$  – коэффициенты усиления приемной антенны по мощности для каждого элемента разрешения, которые полагаем известными при заданном направлении оси ДН  $\mathbf{e}$ .

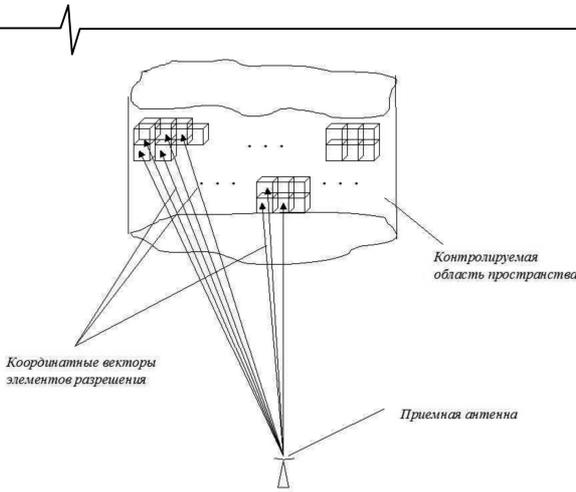


Рис. 1. Разбиение контролируемой области пространства на элементы разрешения

Полученное выражение перепишем в векторной форме

$$p_{\text{вых}}(\mathbf{e}) = \mathbf{w}^T(\mathbf{e})\mathbf{p}_{\text{ист}}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{w}(\mathbf{e}) = [w(\mathbf{r}_1, \mathbf{e}) \ w(\mathbf{r}_2, \mathbf{e}) \ \dots \ w(\mathbf{r}_K, \mathbf{e})]^T$  – весовой вектор,  $\mathbf{p}_{\text{ист}} = [p_{\text{ист}}(\mathbf{r}_1) \ p_{\text{ист}}(\mathbf{r}_2) \ \dots \ p_{\text{ист}}(\mathbf{r}_K)]^T$  – вектор-оригинал, индекс  $T$  обозначает транспонирование.

Вектор-оригинал представляет собой дискретизированную по элементам разрешения искомую функцию  $p_{\text{ист}}(\mathbf{r})$ . Компоненты его равны либо нулю, если в соответствующем элементе разрешения нет источника, либо мощности источника, если он там есть.

Согласно томографическому подходу, сформируем отображение вектора-оригинала как совокупность элементов отображения (2), полученных при различающихся условиях интегрирования. Последние будем изменять, меняя направления оси ДН. Совокупность измененных мощностей и будет искомым отображением

$$\begin{aligned} p_{\text{вых}}(\mathbf{e}_1) &= \mathbf{w}^T(\mathbf{e}_1)\mathbf{p}_{\text{ист}}, \\ p_{\text{вых}}(\mathbf{e}_2) &= \mathbf{w}^T(\mathbf{e}_2)\mathbf{p}_{\text{ист}}, \\ &\dots \quad \dots \\ p_{\text{вых}}(\mathbf{e}_N) &= \mathbf{w}^T(\mathbf{e}_N)\mathbf{p}_{\text{ист}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $N$  – число измерений.

Перепишем систему уравнений (3) в векторно-матричной форме

$$\mathbf{p}_{\text{вых}} = \mathbf{W}\mathbf{p}_{\text{ист}}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{p}_{\text{вых}} = [p_{\text{вых}}(\mathbf{e}_1) \ p_{\text{вых}}(\mathbf{e}_2) \ \dots \ p_{\text{вых}}(\mathbf{e}_N)]^T$  – вектор-отображение,  $\mathbf{W} = [\mathbf{w}(\mathbf{e}_1) \ \mathbf{w}(\mathbf{e}_2) \ \dots \ \mathbf{w}(\mathbf{e}_N)]^T$  – матрица отображения размером  $N \times K$ .

В уравнении отображения (4) вектор отображения  $\mathbf{p}_{\text{вых}}$  известен: он объединяет измеренные и оцифрованные мощности на выходе приемной антенны. Известна и матрица отображения  $\mathbf{W}$ , которая включает коэффициенты усиления антенны по мощности для всех элементов разрешения при каждом направлении оси ее ДН  $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_N$ .

Задача состоит в восстановлении вектора-оригинала  $\mathbf{p}_{\text{ист}}$  по его отображению (4). Решение может быть получено известными способами с использованием цифровой обработки, например, методом псевдообращения [4]:

$$\hat{\mathbf{p}}_{\text{ист}} = \mathbf{W}^+ \mathbf{p}_{\text{вых}}, \quad (5)$$

где индекс  $+$  обозначает операцию псевдообращения матрицы.

Восстановленный вектор (5) является решением поставленной задачи в дискретизированной форме. Компоненты его представляют собой распределение оценок мощностей излучения по элементам разрешения, что является оценкой искомой функции  $p_{\text{ист}}(\mathbf{r})$  с точностью элемента разрешения по местоположению. Местоположения источников определяются координатами элементов разрешения, которые соответствуют максимумам в полученном распределении, а мощности источников – соответствующими значениями этого распределения.

Таким образом, специальная цифровая обработка измеренной выходной мощности приемной антенны позволяет решить поставленную задачу с точностью до размера элемента разрешения по местоположению.

### Результаты компьютерных экспериментов

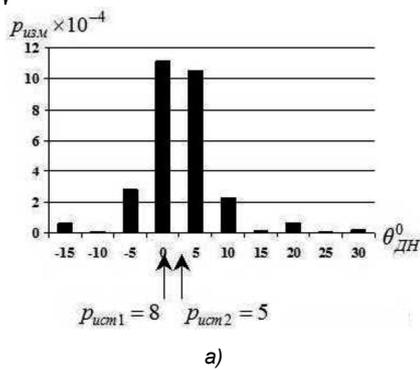
В качестве антенны в экспериментах использовалась 10-элементная линейная фазированная антенная решетка (ФАР). Контролируемая область пространства задавалась координатами граничных точек по оси  $x$ , совпадающей с поверхностью ФАР и по оси  $y$ , перпендикулярной ей:  $x_{\text{нач}} = 10\text{ м}$ ,  $x_{\text{кон}} = 70\text{ м}$ ,  $y_{\text{нач}} = 100\text{ м}$ ,  $y_{\text{кон}} = 1020\text{ м}$ . Число элементов разрешения определяется в экспериментах числом разбиений  $K$  контролируемой области пространства по оси  $x$ . За координаты элементов разрешения принимались координаты их центров. Во всех экспериментах в контролируемой области пространства присутствуют два источника излучения с одной и той же ординатой  $y = 1010\text{ м}$  и разными значениями абсцисс. Мощности источников составляют  $p_{\text{ист1}} = 8$ ,  $p_{\text{ист2}} = 5$ . Диапазон изменения направлений оси ДН при проведении измерений принят от  $-10^\circ$  до  $+30^\circ$ .

Проведено три эксперимента.

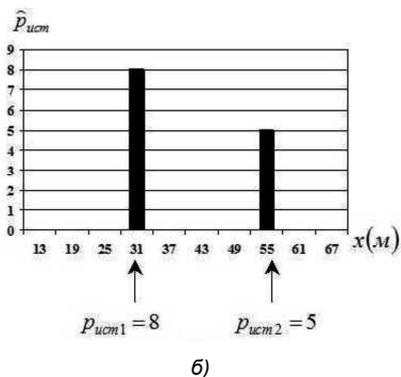
В первом эксперименте (рис. 2) число измерений  $N$  и число элементов разрешения  $K$  равны  $N = K = 10$ . В этом случае матрица отображения квадратная, и при линейно независимых строках ее псевдообратная матрица равна обратной. Тогда выражение (5) приобретает вид

$$\hat{\mathbf{p}}_{\text{ист}} = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{p}_{\text{вых}}.$$

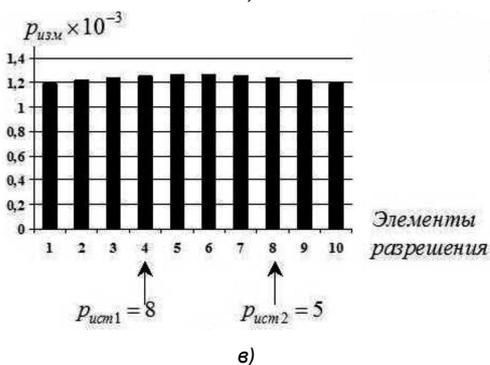
Размер элемента разрешения в первом эксперименте составил  $\Delta x = \frac{x_{\text{кон}} - x_{\text{нач}}}{10} = 6\text{ м}$ . Координаты источников заданы равными: 31 м, 1010 м и 55 м, 1010 м, и совпадают с координатами элементов разрешения. На приведенных на рис. 2 диаграммах соответствующие угловые положения источников показаны стрелками.



а)



б)



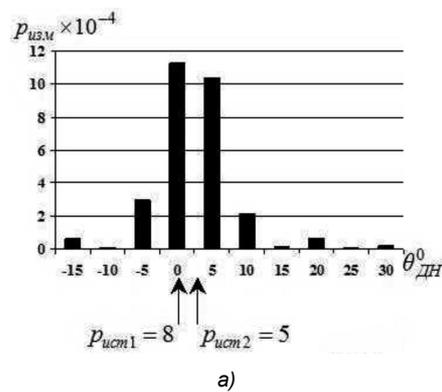
в)

Рис. 2. Измеренные мощности на выходе антенны (а), восстановленное по ним распределение мощностей источников по элементам разрешения (б) и результат сканирования по элементам разрешения (в) при  $x_{ист1} = 31$  м,  $x_{ист2} = 55$  м,  $N=10$ ,  $K=10$

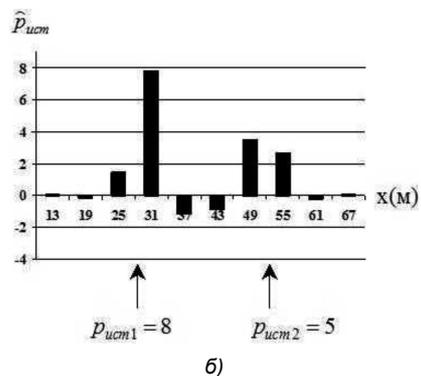
Как видно из диаграммы рис. 2, а), непосредственные измерения мощностей на выходе антенны при разных направлениях оси ее ДН  $\theta^{\circ}_{ДН}$  не дают представления о мощностях источников: они на 3-5 порядков меньше их истинных мощностей, что обусловлено удаленностью источников. На этой же диаграмме видно, что источники по непосредственным измерениям на выходе приемной антенны не разрешаются.

Предложенный метод позволяет по этим измерениям восстановить истинные мощности и координаты источников. Результаты восстановления показаны на диаграмме рис. 2, б). Как явствует из полученных результатов, метод позволил в первом эксперименте точно восстановить местоположения и мощности источников.

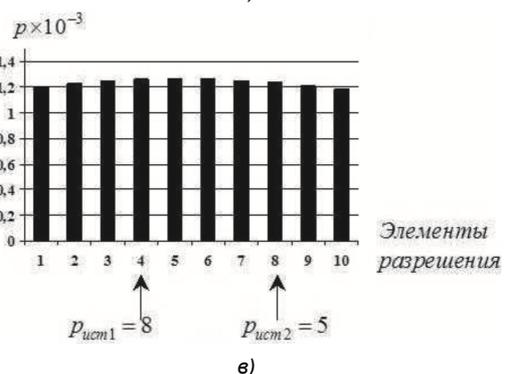
Следует заметить, что шаг изменения направлений оси ДН составлял  $5^{\circ}$ , в то время как направления на источники было  $1,8^{\circ}$  и  $3,1^{\circ}$ . Таким образом, результаты первого эксперимента демонстрируют сверхразрешающие возможности метода.



а)



б)



в)

Рис. 3. Измеренные мощности на выходе антенны (а), восстановленное по ним распределение мощностей источников по элементам разрешения (б) и результат сканирования по элементам разрешения (в) при  $x_{ист1} = 29,5$  м,  $x_{ист2} = 52,5$  м,  $N=10$ ,  $K=10$

Для наглядного подтверждения сверхразрешающих возможностей метода на рис. 2, в) приведены результаты поэлементного сканирования всех элементов разрешения. Как видно из диаграммы, источники и в этом случае не разрешаются, а мощности получаются на 3 порядка меньше действительных.

Второй эксперимент (рис. 3) отличается от первого положением источников: теперь они не совпадают с координатами элементов разрешения. Как видно из диаграммы на рис. 3, б), восстановленное распределение в этом случае «размывается» вблизи истинных положений источников, которые, однако, легко определяются по максимумам в полученном распределении. Что касается мощностей источников, то они восстановились хотя и не точно, но весьма близко к истинным значениям и на 3-4 порядка превосходят измеренные значения по степени близости к истинным значениям. Размер элемента разрешения в эксперименте по-прежнему составляет 6 м по оси  $x$ .

Дополнительный результат по сканированию всех элементов разрешения, приведенный на рис. 3, в), показывает, как и в первом эксперименте, невозможность даже самыми детальными прямыми измерениями оценить мощности или разрешить источники.

В третьем эксперименте (рис. 4) демонстрируются два дополнительных весьма полезных свойства предлагаемого метода: возможность повысить точность определения местоположений источников за счет уменьшения размера элемента разрешения и возможность сократить число измерений. В эксперименте принято число измерений  $N=7$  и число элементов разрешения  $K=16$ . Размер элемента разрешения составляет при этом

$$\Delta x = \frac{x_{\text{кон}} - x_{\text{нач}}}{16} = 3,75 \text{ м.}$$

Положения источников остались такими же, как во втором эксперименте.

На рис. 4, а) показаны измеренные мощности при соответствующих направлениях ДН антенны, а на рис. 4, б) – восстановленная по ним оценка распределения мощностей источников по элементам разрешения.

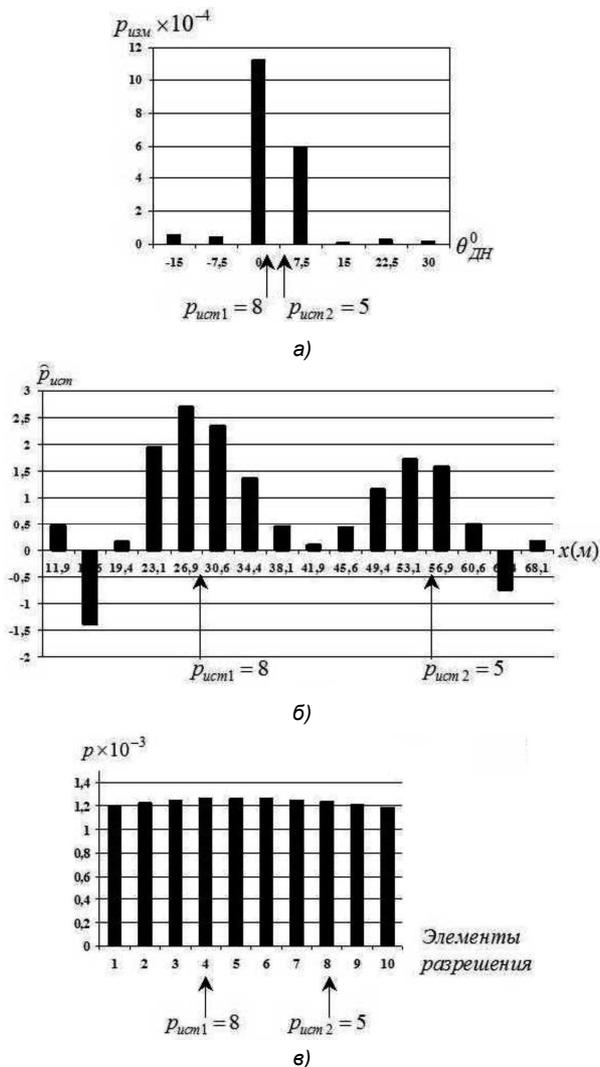


Рис. 4. Измеренные мощности на выходе антенны (а), восстановленное по ним распределение мощностей источников по элементам разрешения (б) и результат сканирования по элементам разрешения (в) при  $x_{\text{ист1}} = 29,5 \text{ м}$ ,  $x_{\text{ист2}} = 52,5 \text{ м}$ ,  $N=7$ ,  $K=16$ .

Теперь точность определения местоположения источников возросла: вместо 6м в предыдущих экспери-

ментах, она составляет 3,75 м. Что касается восстановления мощностей, то, как и во втором эксперименте, они размыты, однако по суммарному значению позволяют оценить истинные мощности источников, в то время как даже сканирование по элементам разрешения (рис. 4, в) не позволяет ни разрешить источники, ни определить хотя бы порядок их мощностей.

### Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Математическое обоснование доказывает возможность определения местоположения источников излучения предложенным методом с точностью до элемента разрешения, размер которого задается априорно, используя цифровую обработку измеренной мощности на выходе приемной антенны,

2. Метод позволяет помимо местоположений оценивать мощности источников излучения, что является важной информацией для решения ряда прикладных задач, например, распознавания объектов.

3. Важным преимуществом метода является возможность определять местоположения и мощности источников, используя однопозиционную приемную систему, которая может быть пассивной.

4. Метод может использоваться для определения местоположений и мощностей сразу нескольких источников. При этом он не содержит поисковых процедур, что весьма привлекательно в плане сокращения времени оценивания и организации измерений.

5. Проведенные компьютерные эксперименты подтверждают работоспособность метода и демонстрируют его свойство сверхразрешения источников излучения, а также возможность не только повышать точность оценивания местоположений за счет уменьшения размера элемента разрешения, но и делать это при одновременном уменьшении числа измерений, что на практике может оказаться весьма полезным.

### Литература

1. Сайбель А.Г. Основы радиолокации. – М.: Изд-во «Советское радио», 1961.
2. Самойленко М.В. Способ определения местоположения и мощностей источников излучения. // Патент № 2444740, Бюл. № 7 от 10.03.2012.
3. Самойленко М.В. Томография и аэрокосмические антенные системы. – М., изд-во МАИ, 2011.
4. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – 4-е изд. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.

### DETERMINATION OF LOCATIONS AND RADIATION POWER OF SOURCES WITH A SINGLE RADAR

*Samoilenko M.V.*

The paper presents a new method which allows to determine spatial coordinates and radiation power of the sources by the measurements of the output power of the receiving antenna with the help of special digital processing. The mathematical statement of the method and the results of the computer experiments are given.