

# Пространственно-временной спектральный анализ сигналов и активных помех в РЛС с цифровыми антенными решетками

Д.Н. Зима<sup>1</sup>, А.А. Спектор<sup>1</sup>, Д.О. Соколова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет, Карла Маркса 20, Новосибирск, Россия, 630073

**Аннотация.** В работе рассмотрены формирование пространственно-временного сигнала на выходе линейной антенной решетки и характеристики этого сигнала в частотной области. Обсуждается понятие широкополосности сигнала в пространственно-временном смысле и рассмотрено его влияние на обнаружение сигнала на фоне активных помех. На основании изучения пространственно-временных спектральных характеристик сигнала и активных помех в радиолокационных системах обзора предложен подход к обработке сигнала, основанный на пространственно-временном спектральном анализе.

## 1. Введение

Магистральным направлением развития радиолокационных систем обзора является применение в них антенных решеток (АР), к числу достоинств которых относится возможность ослабления активных помех за счет формирования диаграмм направленности антенны (ДНА) специального вида. Надежность обнаружения воздушных объектов в РЛС с антенными решетками зависит в значительной степени от методов формирования и обработки сигналов. Развитие цифровых антенных решеток главным образом основано на том, что цифровая обработка сигналов позволяет с высокой точностью реализовать разнообразные алгоритмы обработки сигналов в реальном времени. Наибольшее развитие получил адаптивный подход, при котором обработка сигналов состоит в оценке направлений на постановщики помех и формировании глубоких провалов в синтезируемой ДНА [1-4]. В предлагаемой работе развивается иной подход, основу которого составляет представление сигналов, формируемых при приеме, в виде пространственно-временных функций, теоретические основы которых были представлены в известной монографии [5].

## 2. Формирование пространственно-временного сигнала и помехи на антенной решетке

Эффективной работе систем радиолокационного обзора препятствуют помехи различного происхождения с различными свойствами. Одними из наиболее опасных являются активные помехи, которые часто представляют собой узкополосный случайный процесс с центральной частотой, совпадающей или близкой к несущей частоте радиолокационного сигнала. Данной работе предполагается, что ширина частотного спектра помехи превышает ширину спектра сигнала и, следовательно, ширину частотной полосы пропускания приемного устройства. Если

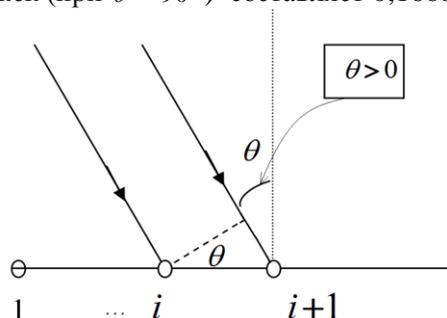
приемник согласован с сигналом, то спектр помехи на его выходе фактически определяется спектром рабочего сигнала.

В работе рассмотрен вопрос формирования пространственно-временного колебания для линейной антенной решетки (ЛАР), рассматривается набор линейно и эквидистантно расположенных в пространстве антенных элементов. Расстояние между парой соседних элементов обычно принимается равным половине длины волны несущего колебания  $\lambda$ . Формируемый сигнал зависит от двух аргументов, представляющих собой временной аргумент  $t$  текущего времени и пространственный аргумент  $x$ , соответствующий координате датчика в пространстве. Для случая ЛАР данный аргумент соответствует номеру антенного элемента. Особое значение имеет представление сигналов в виде пространственно-временного колебания. При поступлении любого сигнала (являющегося функцией времени) на элемент ЛАР, он приобретает пространственный характер. Данное явление формирования пространственной координаты у временного колебания на ЛАР, состоящей из  $I$  - приемных элементов, поясняется рисунком 1. Считаем, что источник излучения расположен в дальней зоне, т.е. фронт поступающей волны на антенну плоский. Сигналы на различных элементах антенной решетки отличаются временными сдвигами, зависящими от направления прихода волны. Так, например, временная задержка между двумя соседними элементами ЛАР составляет величину:

$$\tau_0 = \frac{d \sin \theta}{c} = \frac{\lambda \sin \theta}{2c} = \frac{\sin \theta}{2 f_0},$$

где  $\theta$  - угол прихода волны (см. рисунок 1);  $d = \lambda/2$  - расстояние между элементами антенной решетки;  $\lambda = c/f_0$  - длина волны;  $f_0$  - несущая частота сигнала или центральная частота в спектре активной помехи.

Численные значения задержек малы, например, при частоте несущего сигнала 3ГГц максимальное значение задержек (при  $\theta = 90^\circ$ ) составляет 0,16667 нс.



**Рисунок 1.** Формирование пространственно-временного колебания на ЛАР.

В цифровых обзорных радиолокационных системах осуществляется временная дискретизация. В любой фиксированный момент времени на антенной решетке наблюдается пространственное колебание. Рассматривая множество моментов времени, получаем пространственно-временной сигнал – функцию временной и пространственной координат. Для любого антенного элемента с номером  $i = 1, I$  сигнал имеет вид:

$$u_i(t) = U(t - (i - 1)\tau_0) \cos[\omega_0(t - (i - 1)\tau_0) + \psi(t - (i - 1)\tau_0)]. \quad (1)$$

Все  $I$  сигналов в (1) фактически являются копиями одного и того же сигнала, однако их совокупность содержит информацию о направлении, которая отсутствует в отдельных сигналах. Для качественного анализа можно заменить пространственную переменную  $i$  на непрерывную координату  $x$ :

$$u(t, x) = U(t - \frac{x}{d}\tau_0) \cos[\omega_0(t - \frac{x}{d}\tau_0) + \psi(t - \frac{x}{d}\tau_0)], \quad x \in [0, x_m], \quad (2)$$

где  $x_m$  – линейный размер антенны. В точках  $x = (i - 1) \cdot d$  выражение (2) совпадает с (1), что дает возможность рассматривать сигнал (1) как результат пространственной дискретизации непрерывного пространственно-временного сигнала (2), или выражение (2) как результат интерполяции дискретной функции (1). Но физический смысл имеет непрерывно-дискретный сигнал (1).

Характерной особенностью пространственного сечения двумерного колебания является его колебательный характер. На рисунке 2 приведена двумерная пространственно-временная помеха, полученная методом моделирования прохождения белого гауссовского шума через узкополосный фильтр, согласованный с полезным сигналом. В качестве полезного сигнала рассматривали импульс с линейной частотной модуляцией длительностью 1 мкс, несущей частотой 3ГГц, девиацией частоты 100 МГц.

Если РЛС является импульсной, то, рассматривая множество  $J$  временных отсчетов, соответствующих длительности импульса, совокупность моментов времени  $\hat{t} = (j - 1) \cdot \Delta t$ ,  $j = 1, J$  образует дискретное множество, для всех элементов которого строится строка пространственного сигнала  $u(\hat{t}, x)$ . В результате можно ввести понятие цифрового кадра – двумерного дискретного сигнала  $u(j, i)$ ,  $j = 1, J$ ,  $i = 1, I$ , каждая строка которого с номером  $j$  соответствует фиксированному моменту времени (моменту взятия отсчета), а каждый столбец с номером  $i$  – определенному элементу антенны.

### 3. Широкополосный сигнал в пространственно-временном смысле

В современной радиолокации используются широкополосные сигналы, дающие высокое разрешение по дальности. При использовании понятия пространственно-временного сигнала, следует отдельно определить понятие широкополосности сигнала для его пространственного сечения. Считаем сигнал узкополосным в пространственном смысле, если значения его модулирующих функций в любой момент времени на крайних элементах антенной решетки при любом направлении прихода волны практически одинаково. Для таких сигналов их обработку можно разделить на пространственную и временную. В обратном случае сигнал будет широкополосным в пространственном смысле и его структура уже не будет факторизуемой [6]. Для таких случаев предлагается использовать алгоритмы многомерной цифровой обработки пространственно-временных сигналов.

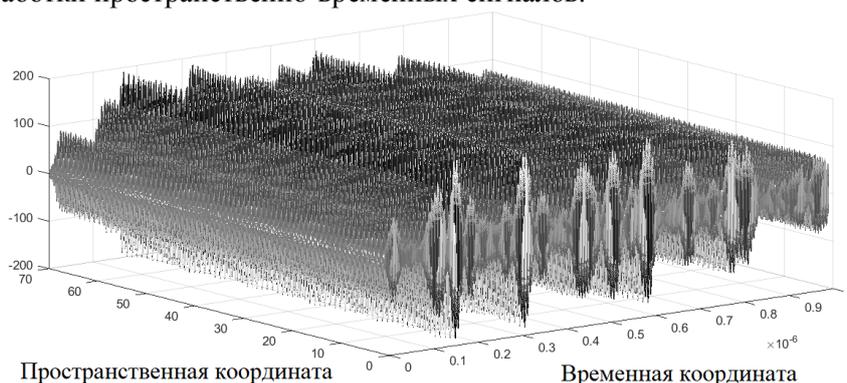


Рисунок 2. Пространственно-временной случайный процесс на ЛАР.

### 4. Пространственно-временной сигнал как двумерный сигнал в спектральной области

Как было описано ранее, на антенной решетке формируется двумерный пространственно-временной процесс, и алгоритмы его обработки строятся на теории цифровой фильтрации многомерных сигналов, в частности используется многомерное преобразование Фурье. С одной точки зрения, не существует принципиальной разницы между цифровой обработкой одномерных и многомерных сигналов [5]. Однако анализ показывает, что использование многомерного характера сигналов содержит дополнительные существенные ресурсы для ослабления действия помех.

Двумерный спектр непрерывного сигнала  $u(t, x)$  находится при помощи двумерного преобразования Фурье:

$$U(\omega_t, \omega_x) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-x_m/2}^{x_m/2} u(t, x) e^{-j\omega_t t - j\omega_x x} dt dx.$$

Здесь  $\omega_t$  и  $\omega_x$  – частоты, соответствующие временному и пространственному колебаниям и называемые далее временная и пространственная частота. Частотное разрешение по пространственной частоте зависит от несущей частоты временного колебания и количества пространственно-распределенных элементов в ЛАР.

На первый взгляд имеем на ЛАР многомерный пространственно-временной процесс, но на каждом датчике присутствует одно и то же колебание. Сигнал в произвольной точке ЛАР с координатой  $x$  отличается  $u(t)$  временной задержкой  $\tau_x = \frac{x \sin \theta}{c}$ :

$$u(t, x) = u(t - k_t x)$$

где  $k_t = \frac{\sin \theta}{c}$  – коэффициент преобразования временной и пространственной координат.

Таким образом, в случае ЛАР получаем частный вид двумерного сигнала, что приводит к существенным особенностям в свойствах двумерного спектра, а именно:

$$\begin{aligned} U(\omega_t, \omega_x) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-x_m/2}^{x_m/2} u(t - k_t x) e^{-j\omega_t t - j\omega_x x} dt dx = \int_{-\infty}^{\infty} u(t_1) e^{-j\omega_t t_1} dt_1 \int_{-x_m/2}^{x_m/2} e^{-j(\omega_t k_t + \omega_x) x} dx = \\ &= U(\omega_t) x_m \frac{\sin[(\omega_t k_t + \omega_x) x_m / 2]}{(\omega_t k_t + \omega_x) x_m / 2}. \end{aligned} \quad (3)$$

При бесконечном размере антенны  $x_m \rightarrow \infty$  (3) принимает вид:

$$U(\omega_t, \omega_x) = U(\omega_t) \cdot \delta(\omega_t k_t + \omega_x),$$

где  $\delta(\cdot)$  – дельта-функция.

Качественный вид двумерного пространственно-временного спектра показан на рисунке 3. Для различных углов прихода колебания положение активной области спектра различно, что может быть основой для разделения сигналов, и в том числе для борьбы с помехами (рисунок 4).

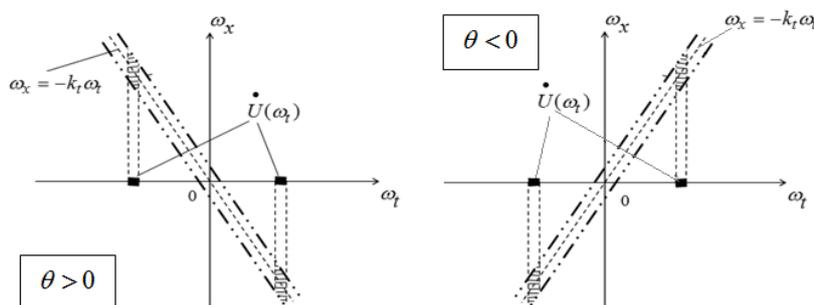


Рисунок 3. Спектр пространственно-временного сигнала.

Выбор точки начала отсчета на линейной антенной решетке и разделение пространства на две области в зависимости от направления прихода волны согласно рисунку 1 объясняет существование в двумерном спектре области отрицательных пространственных и временных частот при угле прихода волны  $\theta < 0$ . На рисунке 4 показан двумерный спектр случайного узкополосного сигнала (см. рисунок 2), в том числе контурный график с линией, соответствующей уравнению  $\omega_x = -k_t \omega_t$  согласно (3).

### 5. Корреляционные характеристики пространственно-временного процесса

Как видно из рисунка 4, спектр пространственно-временного процесса имеет узкий пик, а его положение на плоскости определяется углом прихода волны  $\theta$ , что может стать основой алгоритма обработки таких сигналов. Таким образом, для устройства обработки исследуемой информацией становится случайный процесс, представленный комплексным пространственно-временным спектром. Если в качестве случайного процесса рассматривать процесс, образующийся на выходе элементов ЛАР, т.е. пространственно-временное колебание, его отсчеты являются зависимыми и, например, при Байесовской обработке потребуется обращение матриц размера, соответствующего квадрату произведения числа приемных элементов ЛАР  $m_a$  и числа моментов времени  $m_t$ .

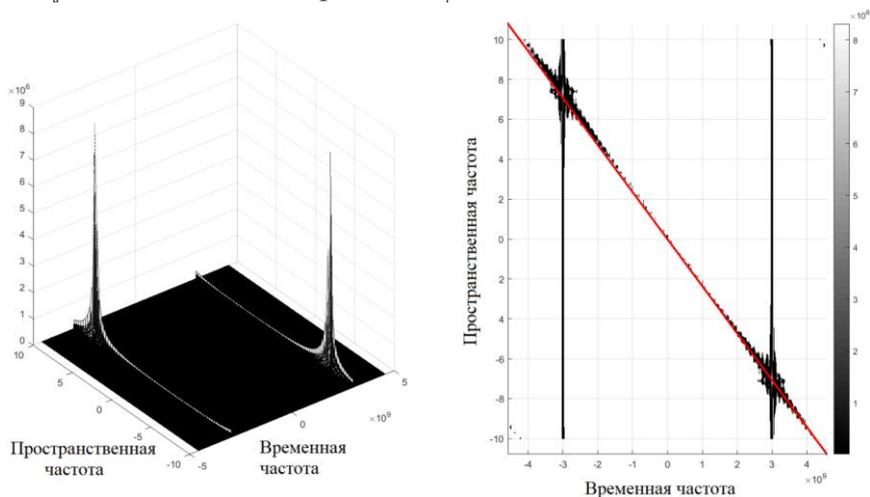


Рисунок 4. Пространственно-временной спектр.

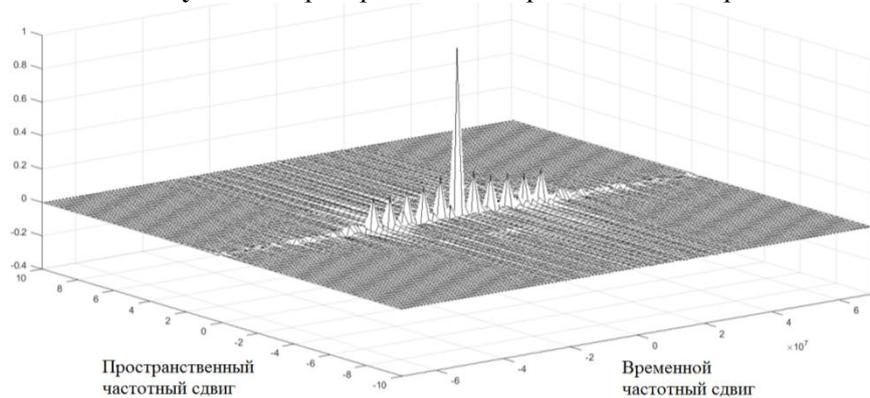


Рисунок 5. АКФ действительной части комплексного пространственно-временного спектра

Для определения характеристик случайного процесса изучались корреляционные функции комплексного спектра пространственно-временного спектра:

1. Автокорреляционная функция (АКФ)

$$R(\Delta \omega_t, \Delta \omega_x) = \sum_{\omega_t} \sum_{\omega_x} \left[ \text{Re} \left( U(\omega_t, \omega_x) \right) \times \text{Re} \left( U(\omega_t - \Delta \omega_t, \omega_x - \Delta \omega_x) \right) \right],$$

$$R(\Delta \omega_t, \Delta \omega_x) = \sum_{\omega_t} \sum_{\omega_x} \left[ \text{Im} \left( U(\omega_t, \omega_x) \right) \times \text{Im} \left( U(\omega_t - \Delta \omega_t, \omega_x - \Delta \omega_x) \right) \right]$$

2. Взаимно корреляционная функция

$$B(\Delta \omega_t, \Delta \omega_x) = \sum_{\omega_t} \sum_{\omega_x} \left[ \text{Re} \left( U(\omega_t, \omega_x) \right) \times \text{Im} \left( U(\omega_t - \Delta \omega_t, \omega_x - \Delta \omega_x) \right) \right],$$

где  $\Delta \omega_t$  - сдвиг по временной частоте,  $\Delta \omega_x$  - сдвиг по пространственной частоте.

Из рисунка 5 видно, что при переходе к спектральной области отсчеты помехи становятся независимыми.

## 6. Заключение

У сигналов, поступающих на антенную решетку, появляются особые природные свойства, если их рассматривать в качестве многомерных сигналов. При приеме сигнала ЛАР формируется двумерный пространственно-временной сигнал, а при приеме плоской антенной решеткой, формируемый сигнал на АР будет зависеть от двух разных пространственных координат, т.е. станет трехмерным пространственно-временным сигналом. Ими можно воспользоваться при обнаружении сигнала на фоне помех, при этом пространственно-временной спектральный анализ ложится в основу оценки максимального правдоподобия.

## 7. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90069.

## 8. Литература

- [1] Воскресенский, Д.И. Активные фазированные антенные решетки / Д.И. Воскресенский, А.И. Канащенков – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.
- [2] Бакулев, П.А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.
- [3] Коростелев, А.А. Пространственно-временная теория радиосистем – М.: Радио и связь, 1987. – 320 с.
- [4] Лозовский, И.Ф. Цифровая обработка сигналов в РЛС обзора – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 270 с.
- [5] Даджион, Д. Цифровая обработка многомерных сигналов / Д. Даджион, Р. Мерсеро – М.: Мир, 1988. – 488 с.
- [6] Елисеев, А.А. Обработка сигналов в радиотехнических системах / А.А. Елисеев, А.П. Лукошкин, А.А. Оводенко, Б.В. Устинов – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1987. – 400 с.

# Spatiotemporal spectral analysis of signals and active interference in radar with digital antenna arrays

D.N. Zima<sup>1</sup>, A.A. Spector<sup>1</sup>, D.O. Sokolova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, K. Marksa 20, Novosibirsk, Russia, 630073

**Abstract.** The work considers the formation of a spatiotemporal signal at the output of a linear antenna array and the characteristics of this signal in the frequency domain. The concept of signal broadband in the spatiotemporal sense is discussed and its effect on signal detection against a background of active interference is considered. Based on the study of the spatiotemporal spectral characteristics of the signal and active interference in side-looking radar system, an approach to signal processing based on the spatiotemporal spectral analysis is proposed.