

И.С. ШОСТКО, канд. техн. наук, Т. АЛМАКАДМА

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ПРИ ПРИЕМЕ СШП СИГНАЛА И ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИЗМЕНЕНИЕ ЕЕ ФОРМЫ

В ряде работ, посвященных сверхширокополосным (СШП) системам [1 – 5], показано, что процессы излучения, приема и обработки сигналов в этих системах значительно отличаются от аналогичных процессов, происходящих в узкополосных системах. Основное отличие связано с изменением формы сигнала при его излучении, распространении в пространстве и приеме. Неизвестная форма сигнала в приемнике затрудняет использование для его обработки коррелятора с опорным сигналом или согласованного фильтра. Наименьшие изменения формы волн будут, если максимумы диаграмм направленности передающей и приемной антенны лежат на одной линии. В связи с этим необходимо использовать методы, позволяющие автоматически корректировать положение максимума диаграммы направленности (ДН) по отношению к источнику излучения.

Рассмотрим возможный вариант построения активной импульсной антенной решетки (АР) с системой формирования луча – рис. 1, где 1 – управляющая схема; 2 – импульсный генератор; 3 – скользящий коррелятор (с перестраиваемым опорным сигналом); 4 – процессор преобразования Фурье; 5 – сумматор.

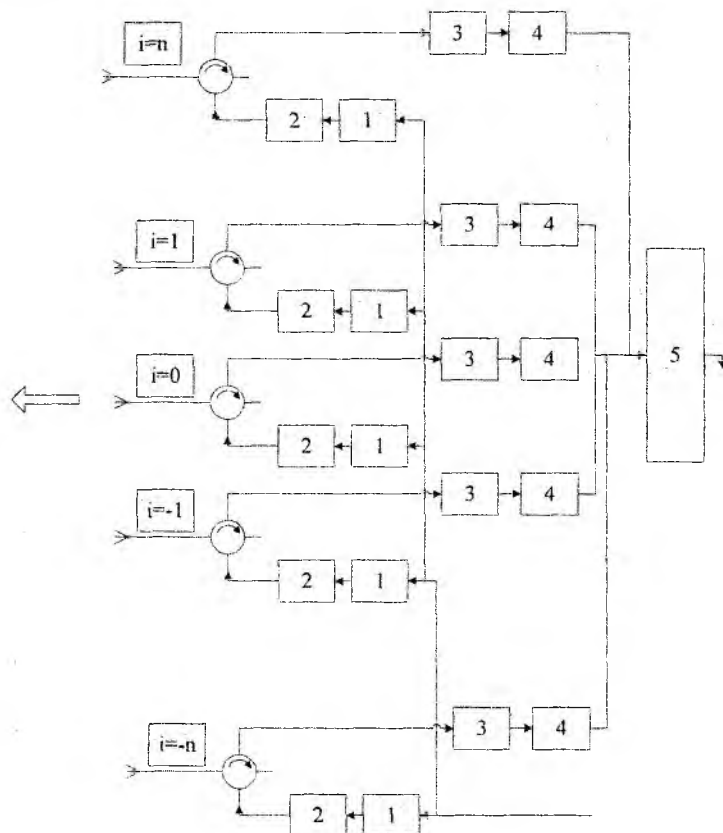


Рис. 1

Зададим количество элементов в эквидистантной АР $N_{изл} = 2n + 1$, линейный размер одного элемента $l/c\tau_u \leq 1$. Элементы антенны являются излучателями и приемниками СШП-сигналов. Модуль передатчика включает в себя генераторы импульсов и управляющие схемы. На вход последней поступают синхроимпульсы запуска. Каждый эле-

мент антенной решетки также связан через переключающий элемент с соответствующим модулем приемника. Модуль приемника состоит из $2n+1$ корреляторов с перестраиваемым опорным сигналом от управляющей схемы, процессоров преобразования Фурье и сумматора.

В режиме передачи сигнала управляющая схема запускает генераторы импульсов с определенной задержкой. Величина задержки, а следовательно, и временной интервал между возбуждением каждого из $i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm n$ элементов АР может изменяться. Таким образом формируется ДН в заданном направлении. Вместо одиночных импульсов сигнал может быть закодирован периодической последовательностью сверхкоротких импульсов (СКИ), с периодом повторения T_n . В этом случае при возбуждении каждого из i элементов АР пачкой из K импульсов с заданной формой $x(t)$ излучается периодическая последовательность СКИ.

В точке расположения приемника, находящегося в дальней зоне под углом θ относительно нормали к АР (рис. 2), сигнал имеет вид

$$S(t, \theta) \equiv \sum_{i=-n}^n \sum_{k=1}^K \frac{dx(t - \tau_k(\theta) - \tau_n(\theta))}{dt}, \quad (1)$$

где нормированная задержка распространения волны

$$\frac{\tau_k(\theta)}{\tau_u} = \frac{\tau_k \sin \theta}{\tau_u} = \frac{T_n}{\tau_u} \sin \theta, \quad 1 \leq k \leq K; \quad \frac{\tau_n(\theta)}{\tau_u} = \frac{id}{c\tau_u} \sin \theta = \frac{i}{2n} \rho_a \sin \theta, \quad (2)$$

$$\rho_a = \frac{2nd}{c\tau_u} = \frac{L}{c\tau_u} = \frac{L\Delta F}{c}, \quad (3)$$

где ΔF – ширина спектра сигнала.

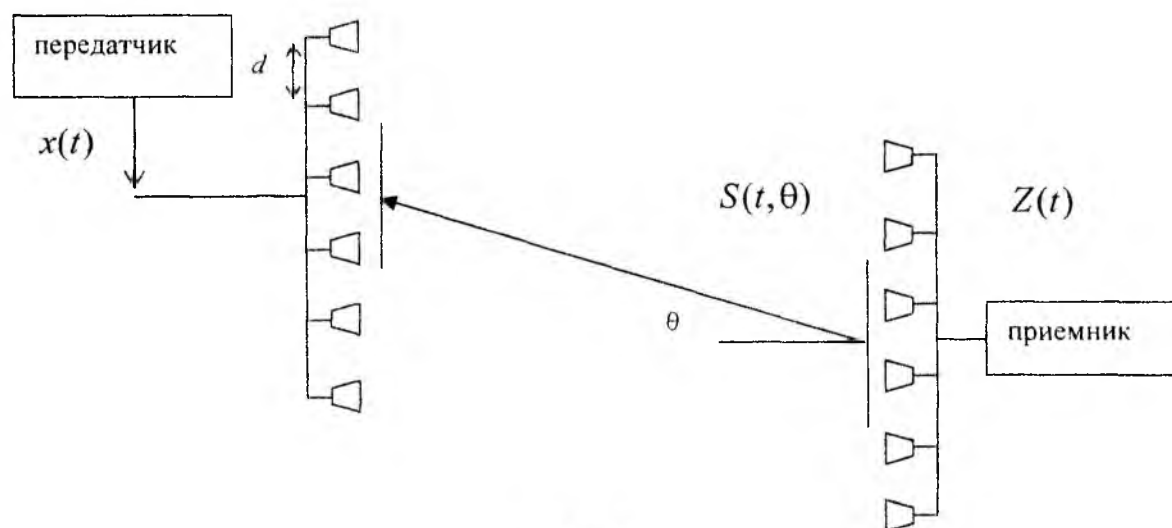


Рис. 2

С учетом прихода m переотраженных сигналов

$$S(t) \equiv \sum_{m=1}^M \sum_{i=-n}^n \sum_{k=1}^K \frac{dx(t - \tau_k(\theta) - \tau_n(\theta) - \tau_m)}{dt}, \quad 1 \leq m \leq M. \quad (4)$$

В (2) и (3) ρ_a – пространственная ширина полосы частот, d – расстояние между излучателями АР, $L = 2nd$ – длина АР. При длительности формируемого импульса $\tau_u = 0.1$ нс, $n = 5$, $d = 30$ см пространственная ширина полосы частот $\rho_a = 100$.

Принятый сигнал:

$$U(t) = S(t) \otimes h_a(t) \equiv \sum_{m=1}^M \sum_{i=-n}^n \sum_{k=1-\infty}^K \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dx(t - \tau_k(\theta) - \tau_n(\theta) - \tau_m - \tau)}{dt} h_a(\tau) d\tau,$$

где $h_a(t)$ – импульсная характеристика приемной антенны.

Рассмотрим особенности формирования диаграммы направленности АР при приеме сигнала и факторы, изменяющие ее форму. Рассмотрим случай, когда $m=1, k=1$. Если на передачу и прием работают одинаковые АР с $n \gg 1$, то можно перейти в (4) от суммирования по n к интегрированию с помощью следующих замен:

$$\eta = \frac{i}{2n}, \quad d\eta = d\left(\frac{i}{2n}\right) \quad \text{и для } i = \pm n \rightarrow -\frac{1}{2} \leq \eta \leq \frac{1}{2}$$

Интегральная форма сигнала $S(t, \theta)$ выражена следующим образом:

$$S(t, \theta) \equiv 2n \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} S\left(t - \eta \frac{\rho_a}{\Delta F} \text{Sin}\theta\right) d\eta. \quad (5)$$

В качестве исходного сигнала выберем модель обобщенного Гауссова импульса [6]:

$$x(t) = \frac{A}{1-\alpha} \left(\exp\left(-\pi \left[\frac{(t-T)}{\tau_u}\right]^2\right)\right) - \alpha \exp\left(-\pi \left[\frac{\alpha(t-T)}{\tau_u}\right]^2\right),$$

где α – масштабный коэффициент; A – пиковая амплитуда в момент времени $t = T$.

Прямое преобразование Фурье от $x(t)$:

$$\Lambda_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt = \frac{A \exp\left\{-j2\pi T \frac{f}{\Delta F}\right\}}{\Delta F(1-\alpha)} \left[\exp\left\{-\pi \left(\frac{f}{\Delta F}\right)^2\right\} - \exp\left\{-\frac{\pi}{\alpha^2} \left(\frac{f}{\Delta F}\right)^2\right\} \right]. \quad (6)$$

Эта форма сигнала удобна тем, что, изменяя его длительность и масштабный коэффициент, можно управлять центральной частотой и шириной спектра. Нормированный спектр плотности энергии сигнала $W(\xi)$ приведен на рис. 3 для $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0,08, \alpha_3 = 0,15, \alpha_4 = 0,3, \alpha_5 = 0,6$ и $\alpha_6 = 2$:

$$W(\xi) = \frac{|\Lambda_x(\xi)|^2}{\left(\frac{A}{\Delta F}\right)^2}, \quad \text{где } \xi = \frac{f}{\Delta F}.$$

Фурье-преобразование от (5):

$$\begin{aligned} \Lambda_s(f, \theta) &= \int_{-\infty}^{\infty} S(t, \theta) e^{-j2\pi ft} dt \equiv 2n \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} S\left(t - \eta \frac{\rho_a}{\Delta F} \text{Sin}\theta\right) e^{-j2\pi ft} d\eta dt = \\ &= 2n \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} e^{-j2\pi f\eta \frac{\rho_a}{\Delta F} \text{Sin}\theta} d\eta \int_{-\infty}^{\infty} S(t) e^{-j2\pi ft} dt = 2n \Lambda_x(f) \text{Sinc}\left[\pi \rho_a \frac{f}{\Delta F} \text{Sin}\theta\right] \end{aligned} \quad (7)$$

где $\Lambda_x(f)$ – амплитудный спектр сигнала (6).

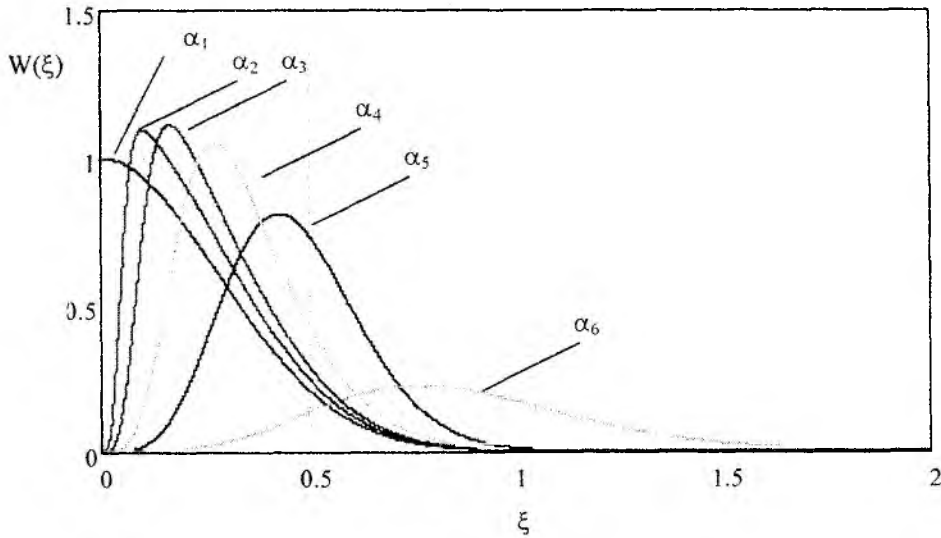


Рис. 3

При приеме сигнала $S(t, \theta)$, падающего на решетку, фронт импульса преобразуется элементами АР в сигналы напряжения $U(t)$. На выходе каждого элемента АР сигнал коррелируется коррелятором, с синхроимпульсом, аналогичным $x(t)$. Процесс корреляции максимизирует отношение сигнал-шум для случая аддитивного белого нормально распределенного шума. После корреляции сигнал преобразуется в частотную область, таким образом можно оценить спектральную плотность энергии принятого сигнала. Это преобразование удобно для пространственно-частотного анализа формы импульса, на выходе системы формирования луча. В принципе, каждый коррелятор может быть расценен как согласованный фильтр, имеющий комплексно сопряженную передаточную функцию $\Lambda_x^*(f)$. После преобразования все сигналы поступают на сумматор SUM. Будем считать, что частотная передаточная функция элементов АР не изменяет спектр сигнала. Тогда, функция спектральной плотности энергии на выходе SUM может быть выражена следующим образом:

$$W_r(f, \theta) = \Lambda_x(f) \Lambda_x^*(f) \left[2n \text{Sinc} \left[\pi \rho_a \frac{f}{\Delta F} \text{Sin} \theta \right] \right]^2 = W(f) [H_a(f, \theta)]^2. \quad (8)$$

В (8) $W(f) = |\Lambda_x(f)|^2 = \Lambda_x(f) \Lambda_x^*(f)$ – спектр плотности энергии, излучаемого СКИ, а $H_a(f, \theta) = 2n \text{Sinc} \left[\pi \rho_a \frac{f}{\Delta F} \text{Sin} \theta \right]$ – частотная передаточная функция системы формирования луча АР.

Функция спектральной плотности энергии $W_r(f, \theta)$ (8) представлена на рис. 4 как функция нормированной частоты $\xi = f / \Delta F$ для $\alpha_1 = 0,15$, $\alpha_2 = 2$, $\rho_a = 100$ и различных углов падения $\theta = 0^\circ; 2^\circ; 5^\circ$. При приеме по нормали к антенной решетке $\theta = 0^\circ$ энергетический спектр $W_r(f, \theta) = W(f)$. Под другими углами энергетический спектр $W_r(f, \theta)$ на выходе сумматора (SUM) является измененной (или промоделированной) версией излученного энергетического спектра $W(f)$. Различные модулированные диаграммы в зависимости от направления, показанные на рис. 4, могут быть использованы как полезная информация для определения углового отклонения максимума ДН от источника сигнала и для формирования сигнала электронного управления лучом. Согласно рис. 4, частота колебания в модулируемом спек-

тре $W_r(f, \theta)$ увеличивается с отклонением от нормали к АР. Следовательно, частоту колебания можно использовать для оценки угла падения θ . Эта оценка может использоваться для вычисления времени задержки, требуемой для каждого элемента антенной решетки, для того, чтобы основной лепесток с помощью системы управления можно было установить в направление источника сигнала.

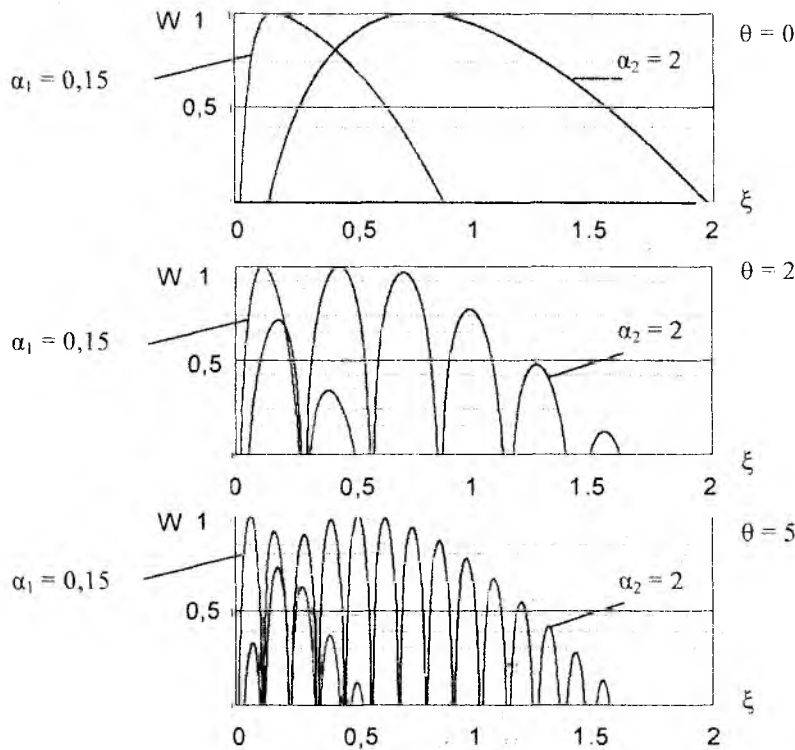


Рис. 4

Энергетическая ДН $D_{r,n}(\theta)$ АР при приеме СКИ (Рис. 5) может быть определена как отношение

$$D_{r,n}(\theta) = \frac{\mathcal{E}_u(\theta)}{\mathcal{E}_u(0)}, \quad (9)$$

где $\mathcal{E}_u(\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} W_r(f, \theta) df \equiv \int_0^{\infty} \left(|\Lambda_x(f)|^2 \text{Sinc} \left[\pi \rho_a \frac{f}{\Delta F} \text{Sin} \theta \right] \right)^2 df$ – энергия принятого импульса на выходе сумматора при произвольной ориентации передающей и приемной антенн; $\mathcal{E}_u(0)$ – энергия принятого импульса на выходе сумматора при соосном расположении передающей и приемной антенн.

Точность ориентации направления максимума ДН на источник излучения зависит от ширины энергетической ДН. Энергетические ДН показаны на рис. 5 для значения $\alpha = 0,15$ и для различных значений ρ_a : $\rho_a = 10$ – точечная линия; $\rho_a = 20$ – штриховая линия; $\rho_a = 50$ – штрих пунктирная линия; $\rho_a = 100$ – сплошная линия. Ширина луча по половинному уровню энергии тем уже, чем больше значение пространственной ширины полосы частот ρ_a . Следовательно, угол разрешения ε , для энергетической ДН $E_n(\theta)$, обратно пропорционален ρ_a , и может быть выражен следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{K}{\rho_a} = \frac{Kc}{L\Delta F},$$

где c – скорость света, K – константа пропорциональности.

Для заданного размера АР – L , для получения минимального угла разрешения ε нужно увеличивать эффективную ширину полосы ΔF сигнала. Ширина ДН может также уменьшаться при увеличении значения параметра α , который определяет форму сигнала.

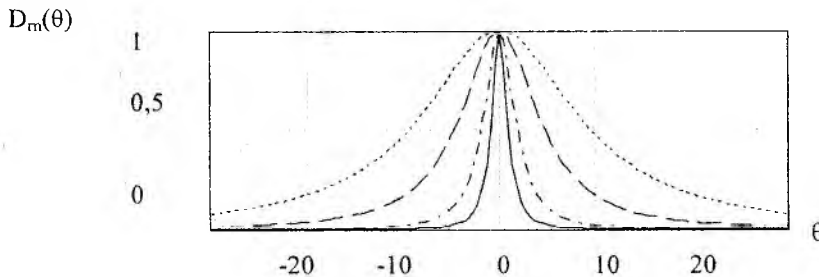


Рис. 5

Выводы

1. Пространственно-временная структура поля зависит от угловых координат. Особенности формирования диаграммы направленности АР можно описать с помощью передаточной функции системы, параметрами которой являются пространственные углы.

2. Принцип управления диаграммой направленности АР основан на свойствах импульсной формы волны и использует изменения в энергетическом спектре принятого сигнала в зависимости от направления приема. Эти изменения формы волны являются полезной особенностью для автоматического управления лучом. Энергетическая ДН импульсной АР характеризуется узким главным лучом и отсутствием боковых лепестков. Ширина луча по уровню 0,5 энергетической ДН АР, определяет угловую разрешающую способность как убывающую функцию эффективной ширины полосы частот.

Список литературы: 1. Хармут Х. Ф. Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1985. 376 с. 2. Астанин Л.Ю., Костылев А.А. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. М.: Радио и связь, 1989. 192с. 3. Самсонов А.В. Пространственно-временные преобразования электромагнитных сигналов. М.: МЭИ, 1997. 4. Иммореев И.Я., Синявин А.Н. Излучение сверхширокополосных сигналов. // Антенны. М.: Радиотехника, 2001. Вып. 1(47).С. 8-16. 5. Шостко И.С., Шостко С.Н., Авчинников Е.А., Гулак В.П. Экспериментальное исследование диаграмм направленности линейных решеток искровых излучателей // Прикладная радиоэлектроника. 2005. № 2. 6. Hussain, Malek G.M. Antenna patterns of no sinusoidal waves with the time variation of a Gaussian pulse. Part I // IEEE Trans. Electromagn. Compat., 1988, vol. EMC-30, no.4. pp. 504-512.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 05.10.2009