

Том II, с. 129–133

УДК: 537.87 + 621.396

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ СШП ХАОТИЧЕСКОГО АНСАМБЛЯ

**Ю. В. Андреев**

*Московский физико-технический институт (НИИУ),  
141700, г. Долгопрудный, Институтский пер. 9  
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
125009, г. Москва, ул. Моховая 11 корп. 7  
E-mail: andreev.iuv@mipt.ru*

**Аннотация.** Ансамбль сверхширокополосных хаотических передатчиков представляет собой новый тип передающих устройств, работающих в режиме коллективного излучения. Характеристики СШП хаотического ансамбля существенно отличаются от характеристик традиционных передающих радиосистем. Аналитически исследована структура поля излучения ансамбля сверхширокополосных хаотических излучателей. Показано, что некогерентное суммирование полей, создаваемых передатчиками ансамбля, не приводит к появлению дополнительных направленных свойств.

**Ключевые слова:** динамический хаос; хаотическая несущая; распространение радиоволн; диаграмма направленности; сверхширокополосный сигнал; некогерентное сложение; коллективный режим; передача информации

## ENERGY RADIATION PATTERN OF UWB CHAOTIC ENSEMBLE

**Yu. V. Andreyev**

**Abstract.** Ensemble of ultrawideband (UWB) chaotic transmitters is a new type of transmitter systems operating in collective transmission mode. Performance of UWB chaotic ensemble differs substantially from those of traditional transmitter radio systems. The structure of the emission field of the UWB chaotic radiator ensemble is studied analytically. As is shown, noncoherent summation of the fields created by the ensemble radiators gives no additional directivity.

**Keywords:** dynamic chaos; chaotic carrier; radio wave propagation; radiation pattern; ultrawideband signal; noncoherent summation; collective mode; information transmission

### Введение

В последние годы сверхширокополосные (СШП) сигналы и системы находят все большее применение в системах радиолокации и передачи информации, и поскольку существует запрос на увеличение дальности действия соответствующих СШП систем, интерес представляет использование коллективных режимов излучения для достижения этой цели.

Для систем СШП радиолокации характерно использование ультракоротких импульсных сигналов («моноцикл Гаусса») и коротких радиоимпульсов. Характеристики излучения таких сигналов исследовались аналитически и численно [1–8]. Отмечено, что для описания направленности излучения СШП систем удобно пользоваться энергетическими характеристиками, интегральными по частоте и длительности импульса [3]. При анализе направленных свойств был сделан вывод, что характеристики направленности излучателя СШП сигнала зависят не только от диаграммы направленности (ДН) антенны, но и от спектра излучаемого сигнала [1–4].

Исследовались характеристики излучения ансамблей СШП излучателей в коллективном режиме. Доступные из литературы данные относятся к решеткам излучателей СШП ультракоротких импульсов (например, [5–8]). Показано, что характеристики направленности таких решеток качественно близки к характеристикам антенных решеток (АР), запитываемых узкополосными

радиосигналами [9]. А именно, для АР, излучающих сверхкороткие импульсы, характерна остро направленная энергетическая диаграмма направленности (ЭДН, ЭКНД). Указывается, что «форма и спектр импульса в дальней зоне существенно зависит от расстояния между излучателями и направления относительно максимума ЭДН» [5]; что учет взаимовлияния элементов АР приводит к обужению полосы и сильным направленным свойствам АР [7]; что антенные решетки могут обеспечивать высокую направленность системы при использовании слабонаправленных антенн [8].

Таким образом, суммирование в пространстве сигналов источников СШП ультракоротких импульсов приводит к появлению выраженных направленных свойств даже при использовании ненаправленных антенн. Следует заметить, что для задач радиолокации данное свойство является скорее положительным, поскольку в этих задачах формирование узкого луча является существенным требованием.

В то же время, при создании беспроводных сетей СШП радиосвязи, особенно сетей с произвольным расположением приемопередающих узлов, может возникать требование всенаправленного характера передачи и приема беспроводного сигнала. Из анализа литературных источников [1–8] следует, что системы на ультракоротких импульсах неспособны обеспечить ненаправленное в коллективном режиме передачи. В этой связи, интерес представляют системы связи на СШП хаотических радиоимпульсах [10].

В данном докладе исследуются характеристики направленности СШП хаотических излучателей и ансамблей таких излучателей. От ультракоротких импульсов (УКИ) и коротких радиоимпульсов (КРИ) их отличают следующие особенности [10, 11].

Сверхширокая полоса частот  $\Delta F$  УКИ и КРИ объясняется их крайне малой длительностью  $\Delta T$ . В отличие от них, хаотические сигналы являются сверхширокополосными в силу внутренней динамики порождающих их нелинейных динамических систем [12]. Поэтому, база УКИ составляет  $B = \Delta F \Delta T \sim 1$ , а база СШП хаотических радиоимпульсов может произвольно меняться в широких пределах за счет изменения длительности импульса [11].

Еще одним существенным отличием хаотических радиоимпульсов является неповторяемость. В ансамбле независимых хаотических излучателей, хаотические радиоимпульсы являются некоррелированными [13], а сложение соответствующих полей в пространстве происходит некогерентным образом.

### Энергетическая диаграмма направленности одиночного СШП хаотического излучателя

В спектральном представлении в свободном пространстве в рамках скалярной модели рассмотрим излучение точечного источника СШП хаотического сигнала. Поле излучателя, расположенного в начале сферической системы координат, в дальней зоне  $kr \gg 1$  в точке приема  $M(\theta, \alpha, r)$  имеет вид расходящейся сферической волны [14]:

$$E(\theta, \alpha, r, \omega) = \frac{A\omega}{r\sqrt{4\pi}} S(\omega) F(\theta, \alpha, \omega) \exp[-j(kr + \varphi)], \quad (1)$$

где  $E$  – комплексная амплитуда электрического поля,  $\theta$  и  $\alpha$  – углы сферической системы координат;  $A$  – множитель, определяющий интенсивность колебаний излучателя;  $S(\omega)$  – комплексная спектральная плотность сигнала на входе антенны;  $F(\theta, \alpha, \omega)$  – нормированная ДН антенны излучателя;  $r$  и  $\varphi(\omega)$  – соответственно расстояние от излучателя до точки наблюдения и случайная фаза его тока возбуждения;  $k = \omega/c$  – волновое число;  $\omega$  – круговая частота излучения;  $c$  – скорость света.

Физический смысл ЭДН излучателя есть зависимость потока излучаемой энергии (мощности) от направления в пространстве. Определим ЭДН  $H(\theta, \alpha)$  как отношение плотности мощности поля излучения источника  $P(\theta, \alpha, r)$  к плотности мощности поля  $P_i(r)$ , создаваемого источником равной мощности при изотропном излучении

$$H(\theta, \alpha) = \frac{P(\theta, \alpha, r)}{P_i(r)}. \quad (2)$$

Очевидно,  $P_i(r) = P_0/4\pi r^2$ , где  $P_0$  – мощность излучения источника, которая с учетом (1) равна

$$P_0 = A^2 \int_{\omega_=}^{\omega_2} |S(\omega)|^2 d\omega, \quad (3)$$

где  $\omega_н$  и  $\omega_в$  – соответственно нижняя и верхняя граничные частоты СШП сигнала. Мгновенная плотность мощности поля  $P(\theta, \alpha, r)$  с точностью до постоянного множителя равна:

$$\begin{aligned} P(\theta, \alpha, r) &= \int_0^\infty |E|^2 d\omega = \int_0^\infty \left| \frac{A}{r\sqrt{4\pi}} S(\omega) F(\theta, \alpha, \omega) \exp[-j(kr + \varphi)] \right|^2 d\omega = \\ &= \frac{A^2}{4\pi r^2} \int_{\omega_=}^{\omega_2} |S(\omega)|^2 F^2(\theta, \alpha, \omega) d\omega. \end{aligned} \quad (4)$$

Отсюда получаем следующее выражение для ЭДН хаотического излучателя

$$H(\theta, \alpha) = \frac{\int_{\omega_=}^{\omega_2} |S(\omega)|^2 F^2(\theta, \alpha, \omega) d\omega}{\int_{\omega_=}^{\omega_2} |S(\omega)|^2 d\omega}. \quad (5)$$

Таким образом, ЭДН СШП излучателя определяется не только ДН антенны излучателя  $F(\theta, \alpha, \omega)$ , но и спектром  $S(\omega)$  излучаемого сигнала. Схожие выражения ранее были получены для излучателей СКИ и КРИ [1–4].

### ЭДН ансамбля СШП хаотических излучателей

Рассмотрим теперь направленные свойства ансамбля хаотических излучателей. Коллективный режим излучения ансамбля будем обеспечивать не с помощью антенной решетки, излучающей один сигнал через несколько антенн, а за счет согласованного излучения набора независимых сигналов. Каждый излучатель ансамбля содержит независимый СШП генератор хаоса, модулятор и собственную антенну с ДН  $F(\theta, \alpha, \omega)$ . СШП хаотические радиоимпульсы излучаются всеми элементами ансамбля одновременно.

Введем ЭДН ансамбля  $H(\theta, \alpha)$  как зависимость потока мощности от направления в пространстве аналогично (2)

$$H_\Sigma(\theta, \alpha) = \frac{P_\Sigma(\theta, \alpha, r)}{P_{\Sigma,i}(\theta, \alpha, r)}, \quad (6)$$

где  $P(\theta, \alpha, r)$  – плотность мощности поля ансамбля в точке приема, а  $P_{i}(\theta, \alpha, r)$  – плотность мощности поля ансамбля таких же излучателей, у которых все антенны заменены на изотропные. Как было показано ранее [15], в дальней зоне  $P_\Sigma(\theta, \alpha, r) = \sum_{n=1}^N P_n(\theta_n, \alpha_n, r_n)$ , так как сигналы независимых хаотических источников не коррелированы, и поля суммируются по мощности.

Тогда для плотности мощности поля ансамбля излучателей с изотропными антеннами имеем  $P_{\Sigma,i}(\theta, \alpha, r) = \sum_{n=1}^N P_{i,n}(r_n)$ , где  $P_{i,n}$  – плотность мощности поля  $n$ -го источника в точке приема при изотропном излучении; аналогично поступаем с  $P(\theta, \alpha, r)$  и получаем ЭДН

$$H_\Sigma(\theta, \alpha) = \frac{\sum_{n=1}^N P_{i,n} H_n(\theta, \alpha)}{\sum_{n=1}^N P_{i,n}} = \sum_{n=1}^N a_n H_n(\theta, \alpha), \quad (7)$$

$$a_n = \frac{P_{Tx,n}}{\sum_{n=1}^N P_{Tx,n}}, \quad (8)$$

где  $P_{Tx,n}$  – мощность излучения  $n$ -го источника. Таким образом, ЭДН ансамбля является линейной комбинацией ЭДН его элементов, причем весовыми коэффициентами являются значения относительной мощности этих элементов.

Из полученного выражения следует важный вывод. Если антенны всех элементов ансамбля одинаковые и одинаково расположены, т.е. их ДН равны  $F_n(\theta, \alpha, \omega) = F_0(\theta, \alpha, \omega)$ ,  $n = 1, \dots, N$ , и соответственно ЭДН  $H_n(\theta, \alpha) = H_0(\theta, \alpha)$ , то  $H(\theta, \alpha) = H_0(\theta, \alpha)$ , т.е. ЭДН всего ансамбля совпадает с

ЭДН каждого его элемента. Например, если антенны всех излучателей ансамбля ненаправленные, то и излучение всего ансамбля также является ненаправленным.

Это свойство ансамбля хаотических излучателей резко отличает его от других систем коллективного излучения, как узкополосных сигналов [9], так и сверхширокополосных УКИ и КРИ [5–8]. Анализ показывает, что направленные свойства излучения ансамбля появляются в том случае, когда в точке приема суммируемые поля являются когерентными. Для узкополосных несущих это происходит ввиду коррелированности синусоидальных сигналов одной частоты. В случае УКИ и КРИ, корреляция сигналов в точке приема связана с тем, что это сигналы с фиксированной формой. Так как величина корреляции зависит от направления на ансамбль от точки приема, появляется угловая зависимость диаграммы направленности ансамбля.

Может показаться некорректным сравнение ансамбля независимых источников с ансамблем излучателей в виде антенной решетки. В самом деле, анализ и моделирование показывают, что если вместо ансамбля независимых СШП хаотических излучателей использовать антенную решетку, запитываемую единственным СШП хаотическим сигналом, то такая решетка покажет остронаправленные свойства даже при использовании ненаправленных антенн. Это объясняется тем, что хотя хаотические сигналы имеют малое время автокорреляции, обратно пропорциональное ширине полосы частот,  $\tau \sim 1/\Delta F$ , в точке приема лучи с относительным временем набега  $\Delta t < \tau$  оказываются коррелированными и складываются по амплитуде.

Однако даже если взять ансамбль независимых излучателей УКИ, добиться ненаправленных свойств невозможно: в точке приема УКИ все равно окажутся коррелированными вследствие хорошей повторяемости формы. Таким образом, из всех типов СШП систем только ансамбль независимых СШП хаотических излучателей способен обеспечить ненаправленные свойства.

### Заключение

Аналитически исследована структура поля излучения ансамбля сверхширокополосных хаотических излучателей. Получены оценки для энергетических диаграмм направленности отдельных СШП излучателей и СШП ансамбля в целом. В силу некогерентности полей, создаваемых излучателями ансамбля, суммирование этих полей в пространстве не приводит к появлению дополнительных направленных свойств.

Работа выполнена по госзаданию.

### Список литературы

1. Зернов Н.В., Меркулов Г.В. Энергетические характеристики апертурных антенн, излучающих негармонические волны // Радиотехника. 1991. – № 1. – С. 68-71.
2. Зернов Н.В. Коэффициент направленного действия и эффективная площадь апертурной антенны при излучении и приеме негармонических сигналов // Радиотехника. 1995. – № 3. – С. 51–52.
3. Иммореев И.Я., Синявин А.Н. Излучение сверхширокополосных сигналов // Антенны. 2001. – № 1 (47). – С. 8–16.
4. Авдеев В.Б. Энергетические характеристики направленности антенн и антенных систем при излучении и приеме сверхширокополосных сигналов и сверхкоротких импульсов // Антенны. 2002. № 7 (62). С. 5–27.
5. Курочкин А.П., Лось В.Ф., Стрижков В.А. Формирование энергетических диаграмм направленности видеоимпульсными сканирующими антенными решетками // Антенны. 2007, № 1 (116), С. 45–54.
6. Разиньков С.Н. Направленные свойства решеток вибраторов, возбуждаемых сверхширокополосными квазирадиосигналами // Радиотехника. 2008. № 6. С. 97–101.
7. Лаговский Б.А. Излучение сверхкоротких импульсов антенными решетками с учетом взаимовлияния элементов // Антенны. 2009. № 9 (148). С. 29–36.
8. Овчаров А.П., Седельников Ю.Е. Антенные решетки для сверхширокополосных радиосредств // Антенны. 2013. № 11 (198). С. 29-35.

9. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки / 2-е изд. пер. с англ. под ред. А.И. Синани. – М.: Техносфера, 2012.
10. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи. – М.: Физматлит, 2002. 252 с.
11. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Кузьмин Л.В., Мохсени Т.И. Сверхширокополосные сигналы для беспроводной связи // Радиотехника, 2008, № 8, С. 83–90.
12. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Панас А.И., Максимов Н.А. Генерация хаоса – М.: Техносфера, 2012, 424 с.
13. Шустер Г. Детерминированный хаос. – М.: Мир, 1988.
14. Каплун В.А., Браммер Ю.А., Лохова С.П., Шостак И.В. Радиотехнические устройства и элементы радиосистем: учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 2002. 294 с.
15. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Лазарев В.А. СШП прямохаотическая передающая панель. Теория и эксперимент // Труды науч. конф. «V Всероссийские Арmandовские чтения», Муром, Россия, 29 июня–1 июля 2015 г.