

Излучение ансамбля источников сверхширокополосных хаотических сигналов

Ю.В. Андреев

*Московский физико-технический институт (государственный университет),
141700, г. Долгопрудный МО, Институтский пер. 9, andreev.iuv@mipt.ru*

Выведены выражения для энергетических характеристик направленности излучения ансамбля независимых сверхширокополосных хаотических излучателей. В отличие от ансамблей излучателей других типов сверхширокополосных сигналов (сверхкоротких импульсов), суммирование полей, создаваемых излучателями ансамбля, не приводит к появлению дополнительных направленных свойств. Например, при использовании ненаправленных антенн поле излучения всего ансамбля также является ненаправленным. Показано, что особенности характеристик СШП хаотического ансамбля обусловлены некоррелированностью сигналов излучателей ансамбля.

Power radiation parameters of ensemble of independent ultrawideband chaotic radiators are investigated analytically. Unlike emitter ensembles of other types of ultrawideband signals (ultrashort pulses), summation of the fields created at the receiver input by the ensemble elements adds no directivity. For instance, if the radiators are equipped with omnidirectional antennas, the ensemble power radiation pattern is also omnidirectional. As is shown, such characteristics of ultrawideband chaotic radiator ensemble are due to the absence of correlation of the radiators' signals.

Практическое применение сверхширокополосных (СШП) радиосигналов для радиолокации и связи в ряде задач связано с использованием ансамблей излучателей, работающих согласованно. Как правило, это вызвано необходимостью увеличения мощности излучения (мощности передачи) при наличии ограничений на мощность единичного излучателя. Например, в радиосвязи на СШП хаотических сигналах, где для увеличения мощности передачи суммируются в пространстве сигналы нескольких приемопередатчиков [1, 2]. Подобный подход используется в СШП радиолокации, так, в работе [3] «для преодоления практических ограничений, связанных с генерацией мощных видеоимпульсов в одном устройстве, предлагается получать требуемую мощность зондирующего сигнала путем суммирования в пространстве сигналов от множества менее мощных источников».

За последние десятилетия проведен ряд теоретических исследований, посвященных изучению характеристик излучения ансамблей (в виде антенных решеток) сверхширокополосных излучателей сверхкоротких импульсов (СКИ) и коротких радиоимпульсов (КРИ) (например, [3–9]).

В работе [3] для антенной решетки (АР), запитываемой сверхкороткими импульсами, сделаны численные расчеты (во временной области) энергетической диаграммы направленности (ЭДН), характеризующей угловое распределение плотности потока энергии видеоимпульсного сигнала за время существования импульса. Исследовано влияние параметров СКИ на ЭДН. Авторы решают задачу численно, а также аналитически рассматривают отдельные частные случаи. Расчеты показывают, что наблюдается остро направленная ЭДН, причем «при излучении элементами решетки симметричных биполярных импульсов форма и спектр импульса в дальней зоне существенно зависит от расстояния между излучателями и направления относительно максимума ЭДН. В зависимости от соотношения эффективной протяженности биполярного импульса и расстояния между излучателями могут формироваться качественно разные ЭДН: при плотном расположении излучателей (с

шагом меньшим, чем эффективная протяженность импульса) формируется безлепестковая ЭДН; а при редком расположении излучателей имеется боковое излучение, уровень которого определяется числом излучателей и их парциальной ДН.»

В статье [8] излучение СКИ антенной решетки описывается во временной области. Выводятся выражения для расчетов формы и спектра излучаемого импульса с учетом дисперсионных свойств взаимовлияния элементов АР, а также характеристик АР. Так, ЭКНД антенной решетки из N элементов равен $G = \frac{N(kd)^2}{\nu+1/2} \cos\varphi$, где d – расстояние между элементами, ДН парциальной антенны $\cos^{\nu}\varphi$, т.е. ЭКНД решетки пропорционален количеству элементов, и независимо от направленности отдельных элементов ЭКНД в процессе сканирования изменяется пропорционально $\cos\varphi$.

Из материалов работ [3-9] можно сделать вывод, что учет взаимовлияния элементов АР приводит к обужению полосы и сильнонаправленным свойствам АР. Так, в работе [9] рассматриваются антенные решетки (АР) для СШП средств ближней радиолокации. Для СШП радиолинии существенное влияние на направленность приема оказывают спектральный состав передаваемого сигнала, способ и параметры обработки сигнала в приемном устройстве, а также частотные свойства передающей антенны. Авторы интересуют синтез АР с требуемой направленностью. В частности, они показывают, что антенные решетки могут обеспечивать высокую направленность системы при использовании слабонаправленных антенн. Для синфазной решетки демонстрируются различия между ДН на центральной частоте и по СШП сигналу. Они близки, но для ДН по СШП сигналу отсутствует выраженная лепестковая структура бокового излучения (нет провалов до нуля, боковое излучение меняется по углу практически монотонно).

Таким образом, анализ литературы показывает, что суммирование в пространстве СШП сверхкоротких импульсов, излучаемых антенной решеткой, приводит к появлению выраженных направленных свойств даже при использовании ненаправленных или слабо направленных антенн.

Возникает вопрос, в какой мере данное свойство является характеристикой излучающих ансамблей и в какой мере оно определяется типом используемых СШП сигналов. В данном докладе исследуются энергетические характеристики направленности ансамблей СШП хаотических излучателей и показывается, что они кардинально отличаются от характеристик АР излучателей сверхкороткоимпульсных (видеоимпульсных) сигналов.

Особенности хаотических сверхширокополосных радиоимпульсов

СШП хаотические радиоимпульсы имеют ряд особенностей, отличающих их от сверхкоротких импульсов и коротких радиоимпульсов [10, 11].

Сверхширокая полоса частот ΔF сверхкоротких радио- и видеоимпульсных сигналов обеспечивается их крайне малой длительностью (сотни пикосекунд – единицы наносекунд). СКИ являются элементарными сигналами с базой $B = \Delta F \Delta T \sim 1$.

В отличие от них, хаотические сигналы являются широкополосными (сверхширокополосными) «от природы», в силу внутренней динамики порождающих их нелинейных динамических систем [12]. Длительность СШП хаотических радиоимпульсов ΔT можно менять в широких пределах, при этом спектр СШП хаотического радиоимпульса практически не зависит от его длительности в широком диапазоне изменения ΔT [11]. Это позволяет формировать СШП хаотические радиоимпульсы практически с произвольной базой.

Еще одним существенным отличием хаотических радиоимпульсов от СКИ является неповторяемость. В силу особенностей формирования, СКИ характеризуются хорошей

повторяемостью, поэтому импульсы, пришедшие в точку приема от разных излучателей ансамбля или антенной решетки, оказываются когерентными, а результат их сложения существенно зависит от взаимных задержек.

В случае ансамбля независимых хаотических излучателей, хаотические радиоимпульсы являются некоррелированными [13], а сложение соответствующих полей в пространстве происходит некогерентным образом. Как будет показано ниже, это свойство существенным образом определяет характеристики ансамблей СШП хаотических излучателей.

ЭДН СШП хаотического излучателя

Для того чтобы построить ЭДН ансамбля СШП хаотических излучателей, выведем начала выражение для ЭДН отдельного 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 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,

θ и α – 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;

ω – круговая частота излучения;

c – скорость света.

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. С учетом (1) мощность излучения равна

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

где ω_n и ω_b – соответственно нижняя и верхняя граничные частоты СШП сигнала.

Мгновенная плотность мощности поля $P(\theta, \alpha, r)$ с точностью до постоянного множителя $1/2Z_0$, где Z_0 – волновое сопротивление свободного пространства, составляет:

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

Отсюда получаем следующее выражение для ЭДН хаотического излучателя

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

Как следует из полученного выражения, ЭДН СШП излучателя определяется не только ДН антенны излучателя $F(\theta, \alpha, \omega)$, но и спектром $S(\omega)$ излучаемого сигнала. Схожие выражения получены и для излучателей СКИ и КРИ [5, 8]. Заметим, что при выводе (5) не делалось предположений о длительности хаотических сигналов, т.е. это выражение справедливо как для хаотических радиоимпульсов, так и для излучения непрерывного хаотического сигнала.

ЭДН ансамбля СШП хаотических излучателей

Рассмотрим ансамбль независимых СШП хаотических излучателей. Под «независимостью» излучателей будем понимать то, что каждый излучатель имеет собственный источник СШП хаотических колебаний, источники не связаны между собой, поэтому сигналы хаотических источников не коррелированы.

Исследуем направленные свойства ансамбля независимых сверхширокополосных хаотических передатчиков. Введем ЭДН ансамбля $H_{\Sigma}(\theta, \alpha)$ как зависимость потока мощности от направления в пространстве аналогично (2)

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

где $P_{\Sigma}(\theta, \alpha, r)$ – плотность мощности поля ансамбля в точке приема $M(\theta, \alpha, r)$, а $P_{\Sigma, i}(r)$ – плотность мощности поля ансамбля излучателей с изотропными антеннами. Как было показано ранее [1, 2], для ансамбля излучателей независимых СШП хаотических сигналов плотность мощности суммарного поля $P_{\Sigma}(\theta, \alpha, r)$ равна сумме плотностей мощности полей отдельных источников $P_n(\theta_n, \alpha_n, r_n)$. Это связано с тем, что сигналы независимых хаотических источников не коррелированы, поэтому соответствующие поля суммируются некогерентным образом.

Тогда с учетом выражения (2) в дальней зоне ($\Delta r \ll r$) получаем

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

где $P_{i, n}$ – плотность мощности поля n -го источника в точке $M(\theta, \alpha, r)$ при изотропном излучении.

Таким образом, ЭДН ансамбля является линейной комбинацией ЭДН отдельных элементов ансамбля, причем весовыми коэффициентами являются относительные значения мощности излучения этих элементов.

Из полученного выражения следует вывод: если антенны всех элементов ансамбля одинаковые и одинаково ориентированы в пространстве, т.е. имеют одинаковые ДН $F_n(\theta, \alpha, \omega) = F_0(\theta, \alpha, \omega)$ и соответственно все излучатели имеют одинаковые ЭДН $H_n(\theta, \alpha) = H_0(\theta, \alpha)$, то $H_{\Sigma}(\theta, \alpha) = H_0(\theta, \alpha)$, т.е. ЭДН всего ансамбля совпадает с ЭДН каждого отдельного элемента. Такое свойство ансамбля хаотических передатчиков резко отличает его от ансамбля когерентных излучателей, для которого характерно появление направленных свойств даже при ненаправленном характере излучения составляющих ансамбль элементов [3-9].

Теоретические выводы подтверждены путем численного моделирования. В качестве примера на рис. 1 приведена диаграмма мощности сигнала на входе приемника для линейного ансамбля $N = 16$ независимых СШП хаотических

излучателей с антеннами с круговой ДН. Можно видеть, что ЭДН ансамбля повторяет форму ЭДН антенн излучателей ансамбля. Как и ожидалось, численные эксперименты показали, что вид энергетической диаграммы направленности ансамбля не зависит от расстояния между излучателями d .

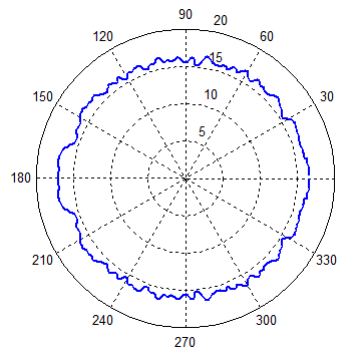


Рис. 1. Диаграмма мощности поля ансамбля с ненаправленными антеннами.

Роль хаоса в свойствах направленности ансамбля СШП хаотических излучателей

Таким образом, направленные свойства ансамбля СШП хаотических излучателей существенно отличаются от свойств ансамблей излучателей СКИ, для которых характерно появление направленной ЭДН даже при использовании ненаправленных антенн. Анализ показывает, что причиной этого является коррелированность полей, создаваемых разными излучателями в точке приема. Так как величина этой корреляции определяется относительными задержками $\Delta t_{ij} = (r_i/c - r_j/c)$ распространения сигналов от разных излучателей до точки приема, а геометрические размеры L ансамбля излучателей СКИ сопоставимы с пространственной протяженностью импульсов $l_{и} = T_{и}c$, в результате появляется зависимость ЭДН такого ансамбля от угловых координат.

В отличие от ансамблей излучателей СКИ, поля, создаваемые в точке приема разными излучателями СШП хаотического ансамбля, являются некогерентными в силу независимости хаотических генераторов излучателей ансамбля. Поэтому относительные задержки распространения СШП хаотических сигналов от разных излучателей до точки приема не имеют значения, а соответствующие поля суммируются по мощности. Таким образом, суммирование в пространстве полей независимых хаотических излучателей не приводит к направленности СШП хаотическому ансамбля.

Направленные свойства «синфазной» СШП антенной решетки

Уникальные свойства рассмотренного выше ансамбля СШП хаотических излучателей обусловлены некоррелированностью излучаемых ансамблем хаотических радиоимпульсов. Чтобы полнее проиллюстрировать это утверждение, рассмотрим модельный пример с линейной решеткой излучателей, запитываемой одним СШП хаотическим сигналом; шаг решетки d ; ДН всех антенн $F_n(\theta, \alpha, \omega) = 1$. Рассмотрим случай «синфазной» антенной решетки, с нулевой разницей во времени всех излучателей.

В этом случае, в точке приема $M(\theta, \alpha, r)$ сигналы излучателей уже нельзя считать независимыми и некоррелированными. Точнее, согласно следствию из теоремы Винера–Хинчина [15], время автокорреляции τ шумоподобного сигнала с шириной полосы ΔF составляет $\tau = 1/\Delta F$. Например, для ранее упомянутых приемопередатчиков ППС-4х, имеющих ширину полосы частот $\Delta F = 2$ ГГц, время автокорреляции составляет

$$\tau = 1/\Delta F = 0,5 \text{ нс}, \quad (8)$$

что соответствует длине $l = 15 \text{ см} = 2\lambda$ (см. рис. 2). Это означает, что в точке приема волны от разных излучателей с относительным набегом порядка l и менее остаются коррелированными. Поэтому для такой линейки появляется сильная зависимость диаграммы направленности, как от угла азимута α , так и от шага решетки d .

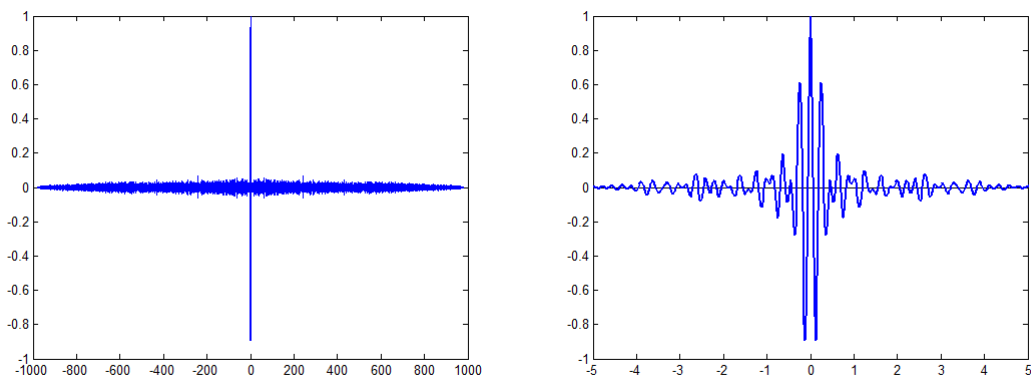


Рис. 2. Автокорреляционная функция модельного хаотического сигнала (справа фрагмент центральной части).

Поскольку ансамбль излучателей применяется для увеличения мощности передачи, удобно оценивать его эффективность с помощью характеристики усиления G , которая показывает, во сколько раз мощность сигнала ансамбля в точке приема $M(\theta, \alpha, r)$ выше мощности единственного излучателя с изотропной антенной, размещенного в центре ансамбля. На рис. 3 представлены диаграммы усиления $G(\alpha)$ для рассматриваемой решетки.

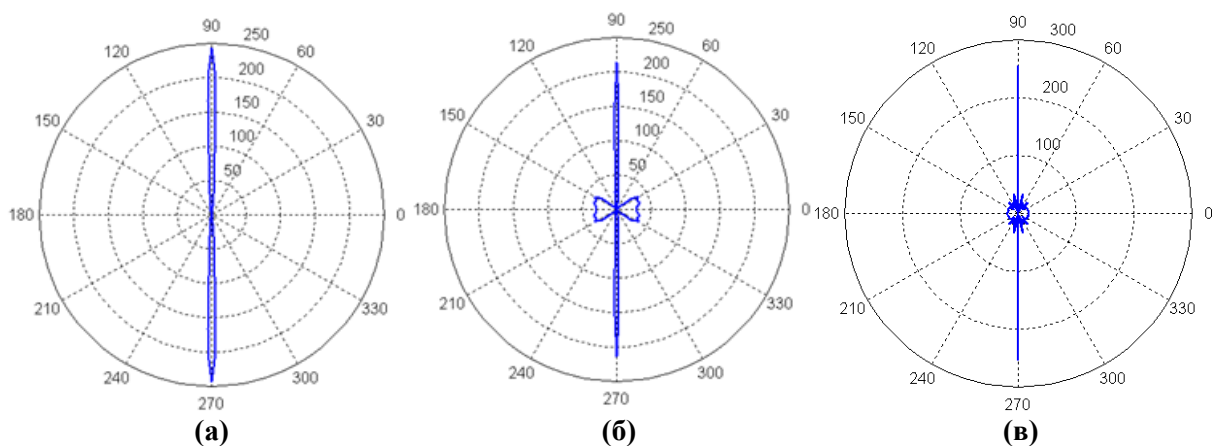


Рис. 3. Диаграмма усиления $G(\alpha)$ для «синфазного» ансамбля в виде линейки $N = 16$ хаотических источников с шагом: а) $d = \lambda_{\text{ср}}/2$, б) $\lambda_{\text{ср}}$, в) $2\lambda_{\text{ср}}$.

Как можно видеть из рис. 3, при малом шаге решетки d элементы ансамбля являются довольно сильно коррелированными, поэтому диаграмма излучения $P_{\text{rx}}(\alpha, r)$ напоминает диаграмму направленности синфазной решетки с единственным узким лепестком и усиления вдоль основного луча $G(\alpha=\pi/2) = N^2$. При увеличении шага линейки d появляются боковые лепестки. При шаге $d = 2\lambda$, равном длине автокорреляции $l = c\tau$, длина основного лепестка остается практически неизменной, но появляется «юбочка» из боковых лепестков. При дальнейшем увеличении шага d «юбочка» на диаграмме излучения $P_{\text{rx}}(\alpha, r)$ начинает приближаться к круговой форме, а ее изрезанность ожидаемо уменьшается. Это связано с тем, что при отклонении от

фронтального направления $\alpha = \pi/2$ относительный набег радиоволн от элементов решетки увеличивается и становится сравним с длиной автокорреляции, а затем начинает ее превышать.

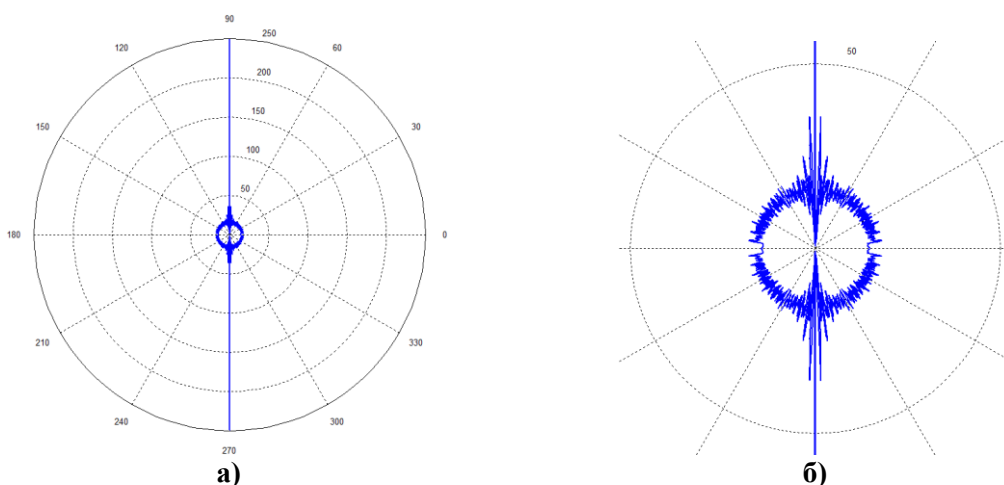


Рис. 4. Диаграмма усиления $G(\alpha)$ для «синфазного» ансамбля с шагом $d \gg l$ ($d = 6l$); а) диаграмма $G(\alpha)$, б) фрагмент центральной части.

При расстоянии между элементами ансамбля заметно превышающем «длину» автокорреляции, $d \gg l$, диаграмма $G(\alpha)$ имеет сверхузкий луч в направлении $\alpha = \pi/2$ с усиления $G = N^2$ и круглую «юбочку» радиусом $G(\alpha) = N$, т.е. представляет собой комбинацию сверхузкого луча с круговой диаграммой. Это хорошо видно на рис. 4, где показана диаграмма усиления $G(\alpha)$ для «синфазной» линейки с шагом $d = 6l = 12\lambda$.

Таким образом, антенная решетка СШП хаотических излучателей демонстрирует различные варианты диаграммы направленности в зависимости от соотношения между расстоянием между излучателями d и длиной автокорреляции l .

Заключение

Выведены выражения для энергетических характеристик направленности излучения ансамбля независимых сверхширокополосных хаотических излучателей. Суммирование полей, создаваемых излучателями ансамбля, в пространстве происходит по мощности и не приводит к появлению дополнительных направленных свойств, так как относительные задержки между сигналами излучателей ансамбля в точке приема оказываются несущественными. Показано, что особенности характеристик СШП хаотического ансамбля по отношению к ансамблям излучателей других типов СШП сигналов (сверхкоротких импульсов) обусловлены некоррелированностью (независимостью) сигналов излучателей ансамбля.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-00084).

Литература

1. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Лазарев В.А. Коллективная передача информации сверхширокополосным прямохаотическим ансамблем // Физические основы приборостроения. 2017, т. 6, №2 (24), с. 80-89.
2. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Лазарев В.А. СШП прямохаотическая передающая панель. Теория и эксперимент // Труды Всеросс. научн. конф. «V Всероссийские Армандовские чтения», Муром, Россия, 29 июня–1 июля 2015 г.

3. Курочкин А.П., Лось В.Ф., Стрижков В.А. Формирование энергетических диаграмм направленности видеоимпульсными сканирующими антенными решетками // Антенны. 2007, № 1 (116), с. 45-54.
4. Калашников А.Е., Бобрешов А.М. Формирование энергетических диаграмм направленности сверхширокополосных антенных решеток с пониженным уровнем бокового излучения // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2013. т. 56, № 3, с. 3.
5. 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.
6. Курочкин А.П., Лось В.Ф., Стрижков В.А. Зависимость энергетической ДН видеоимпульсной антенной решетки от формы импульсов и распределения их амплитуд // Антенны. 2007. № 3. с. 11-19.
7. Разиньков С.Н. Направленные свойства решеток вибраторов, возбуждаемых сверхширокополосными квазирадиосигналами // Радиотехника. 2008. № 6. С. 97-101.
8. Лаговский Б.А. Излучение сверхкоротких импульсов антенными решетками с учетом взаимовлияния элементов // Антенны. 2009. № 9 (148). с. 29-36.
9. Овчаров А.П., Седельников Ю.Е. Антенные решетки для сверхширокополосных радиосредств // Антенны. 2013. № 11 (198). с. 29-35.
10. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Кузьмин Л.В., Мохсени Т.И. Сверхширокополосные сигналы для беспроводной связи // Радиотехника. 2008, №8, с. 83–90.
11. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи. – М.: Физматлит, 2002. 252 с.
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. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Часть 1. Случайные процессы. – М.: Наука, 1966 г.