

МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО КОГЕРЕНТНОГО СЛОЖЕНИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ХАОТИЧЕСКИХ РАДИОИМПУЛЬСОВ, ФОРМИРУЕМЫХ НЕЗАВИСИМЫМИ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ¹

© 2024 г. А. С. Зубков^{a, b}, Л. В. Кузьмин^{a, *}, Е. В. Ефремова^a

^aИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация

^bМосковский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московской области, 140701 Российская Федерация

*E-mail: lvkuzmin@gmail.com

Поступила в редакцию 10.11.2023 г.

После доработки 19.03.2024 г.

Принята к публикации 26.03.2024 г.

Предложена модель пространственно-временного сложения сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов. Обосновывается целесообразность использования данной модели для анализа сценариев когерентного во времени излучения независимыми источниками сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов в беспроводных сверхширокополосных системах. Рассмотрены сценарии, когда расстояние до точки приема много больше характерного размера группы излучателей, когда точка приема находится между излучателями, и получены распределения суммарной энергии импульсов в пространстве для этих сценариев.

Ключевые слова: сверхширокополосные сигналы, хаотические сигналы, когерентная обработка хаотических сигналов, генерация хаотических колебаний

DOI: 10.31857/S0033849424040104, EDN: JRHAGM

ВВЕДЕНИЕ

Когерентное сложение радиосигналов по-разному используется в современных отраслях радиофизики и радиотехники. Одним из ярких примеров использования этого явления на современном этапе развития радиосистем являются, по-видимому, различного рода пространственно-разнесенные системы. Например, разнесение излучателей в пространстве и во времени в многоантенных системах рассматривается как естественный путь развития беспроводных технологий для увеличения пропускной способности каналов связи [1–5]. В частности, в работах [6,7] рассматривают теоретико-информационные подходы к кооперативному формированию сообщений (сигналов) от нескольких пользователей, передаваемых в адрес базовой станции для увеличения скорости и повышения помехоустойчивости передачи информации в канале с шумом и многолучевым распространением. Кооперативная доставка информации за счет ретрансляции и выбора ее наиболее надежного пути обсуждается в [8], концепция распределенных

антенных систем в системах сотовой связи развивается в [9].

В [10] рассматриваются вопросы разработки многоантенных систем для реализации некогерентного приема за счет: 1) отказа от оценки функции отклика канала [11]; 2) перехода к некогерентному приему, как в сверхширокополосных (СШП) системах; 3) разработки методов такого приема для многопользовательских систем [12].

Безусловно, рассматривая пространственное разнесение источников излучения, нельзя не упомянуть фазированные антенные решетки [13], в том числе в перспективных системах на основе фотоники [13,14].

С практической точки зрения большой интерес представляют системы формирования электромагнитного поля в ближней по отношению к антенной системе зоне. Например, в [15] решается задача фокусировки электромагнитного поля в заданной точке пространства внутри помещения, которая находится между излучателями радиосигналов. Фокусировка необходима для увеличения мощности сигнала в заданной точке пространства за счет когерентного сложения радиосигналов при решении задачи пространственного разделения пользователей.

¹ Работа доложена на X Международной конференции “Инжиниринг и Телекоммуникации — En&T-2023”.

Аналогичная задача решается и для условий распространения сигнала вне помещений [16].

В данной работе предложена модель когерентного излучения и сложения в контексте СШП-сигналов. Эта модель интересна и важна, поскольку когерентное сложение СШП-сигналов в точке приема позволяет увеличить отношение сигнал/шум, что имеет практическую значимость в силу существующих ограничений на допустимую спектральную плотность мощности излучаемых СШП-сигналов.

Концепция беспроводной связи на хаотических сигналах на сегодняшний день прошла большой путь от базовых схем передачи данных [17] до многообразия практически ориентированных систем, которые охватывают в том числе и радиодиапазон [18, 19]. В настоящее время представляют интерес вопросы оптимального приема хаотических СШП-сигналов в канале с шумом [19], вопросы формирования хаотических сигналов заданной формы [20], применения хаотических СШП-сигналов для задач измерения расстояния между объектами и их позиционирования относительно системы маяков [21].

Предпринимаются попытки создать аналог многоантенных систем передачи информации на хаотических сигналах [22, 23]. К классу многоантенных систем также относятся антенные решетки с регулярной [24–32] и нерегулярной [33–37] структурами, предназначенные для излучения СШП-сигналов.

Рассматриваемая в данной работе модель состоит из излучателей хаотических СШП-радиоимпульсов (фрагментов хаотических сигналов, формируемых генераторами хаоса) и имеет следующие свойства:

– ограничение на расстояние между излучателями отсутствует, т.е. допускается их произвольное (в том числе неупорядоченное) расположение в пространстве друг относительно друга;

– отсутствует ограничение на выбор моментов времени излучения хаотических радиоимпульсов.

Это означает, что точка приема, в которой фокусируется сигнал от всех излучателей, может находиться как вблизи с излучателями, так и вдали от них.

Некоторые вопросы диаграммообразования для хаотических СШП-сигналов рассматривались в [38], где исследовалось формирование паттерна (поля излучения) при излучении независимых хаотических радиоимпульсов ансамблем излучателей и их некогерентном сложении в приемнике. Ряд вопросов когерентной обработки хаотического СШП-сигнала в рамках концепции радиосвета [39] рассматривался в [40].

Цель работы — предложить модель, описывающую когерентное сложение хаотических

СШП-радиоимпульсов в пространстве и времени, которая послужит в дальнейшем инструментом для исследования процессов диаграммообразования при излучении и приеме таких сигналов.

Одной из ключевых задач, требующих решения для когерентного излучения и приема хаотических СШП-радиоимпульсов, является задача формирования сигналов одинаковой формы. В [20] было показано, что различные экземпляры конструктивно идентичных аналоговых генераторов хаоса способны формировать воспроизводимые фрагменты хаотического сигнала. Это позволяет создавать независимые излучатели хаотических радиоимпульсов, управляя которыми можно когерентно фокусировать энергию хаотического сигнала в заданных точках пространства, что дает возможность реализации подходов к направленной передаче информации путем излучения хаотических радиоимпульсов в определенные моменты времени и формирования таким образом заданной пространственно-временной структуры электромагнитного поля. В работе предложена математическая модель этого процесса, позволяющая оценить на примере использования реальных хаотических сигналов эффективность когерентного сложения хаотических колебаний и целесообразность данного подхода для задач беспроводной передачи данных.

1. ГЕНЕРАТОРЫ ХАОТИЧЕСКИХ РАДИОИМПУЛЬСОВ

Концепция предлагаемой в работе модели основана на возможности [20] формирования СШП-радиоимпульсов с помощью генераторов хаотических колебаний. Была использована модель одностороннего генератора (рис. 1). Выбор данного генератора обусловлен тем, что для этого класса генераторов экспериментально показана возможность формирования под действием внешнего модулирующего сигнала потока хаотических радиоимпульсов, начальные участки у которых совпадают [20, 41–43]. Система дифференциальных уравнений, описывающих данный генератор приведена в [20].

На рис. 2 приведен пример реализации хаотических радиоимпульсов [20], формируемых различными экземплярами генераторов хаоса. Хаотические радиоимпульсы имеют начальный участок, форма которого совпадает у разных экземпляров генератора. За пределами этого участка траектории расходятся. Выбор режима колебаний позволяет формировать начальный участок различной формы, тем самым получая импульсы нужной формы и длительности, а также воспроизводить их форму от импульса к импульсу, что является необходимым для реализации когерентного сложения.

Было показано [44], что это свойство сохраняется при излучении импульсов различными генераторами с помощью антенн. При этом на приемной

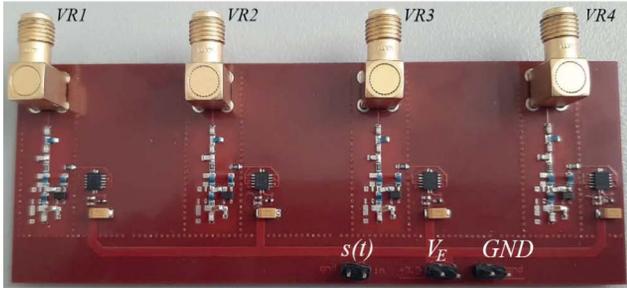
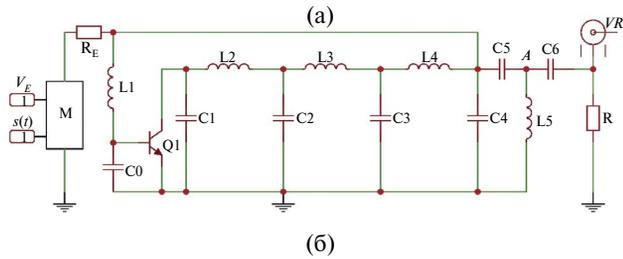


Рис. 1. Схема генератора хаоса (а) и внешний вид макета (б) из четырех одинаковых генераторов [20]: V_E — напряжение питания; $s(t)$ — модулирующий сигнал; M — модулятор; $VR1, VR2, VR3, VR4$ — выходы генераторов, GND — земля.

антенне наблюдается сохранение формы начального участка импульса и увеличение его амплитуды за счет когерентного сложения.

2. МОДЕЛИ СИГНАЛОВ И ИХ СВОЙСТВА

Свойство когерентного сложения хаотических радиоимпульсов, закладываемое в модель, может быть продемонстрировано на примере сложения экспериментальных реализаций импульсов, полученных с помощью запоминающего осциллографа. На рис. 3а приведены реализации от четырех различных генераторов, а на рис. 3б — результат их сложения. На протяжении идентичной части хаотических радиоимпульсов $T_{ID} \cong 30$ нс импульсы складываются когерентно, в результате чего мощность сигнала увеличивается в 16 раз. Суммирование сигналов в пределах тела импульса (несовпадающих частей импульса) соответствует некогерентному сложению, при этом мощность сигнала увеличится в 4 раза. В случае сложения M радиоимпульсов произойдет увеличение мощности в M^2 раз для когерентного участка и в M раз для некогерентного участка радиоимпульса. Таким образом,

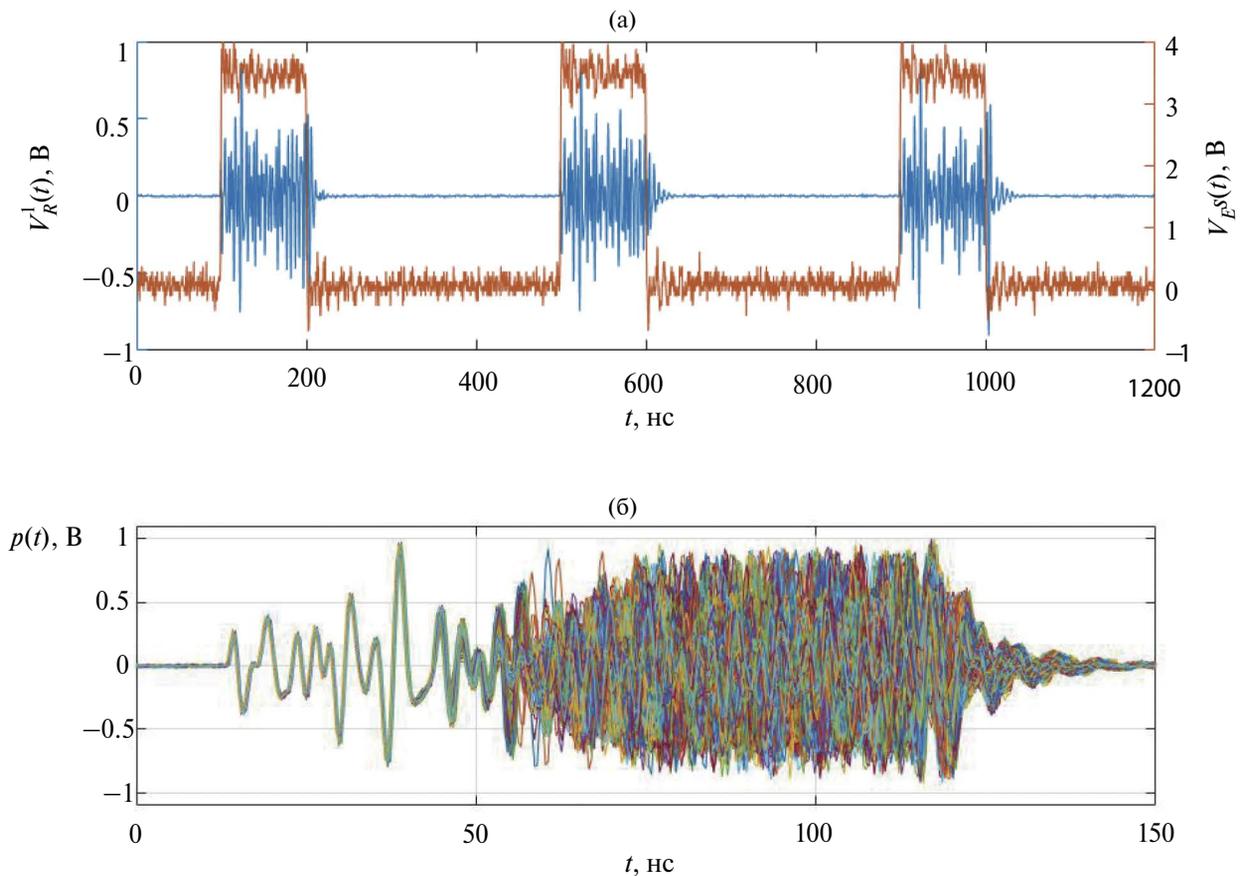


Рис. 2. Фрагмент временной реализации (а) хаотических радиоимпульсов $V_R^1(t)$ на выходе первого генератора (см. рис. 1), которые формируются в результате воздействия модулирующего сигнала $V_E^s(t)$, и (б) множество хаотических радиоимпульсов (1000 шт.), генерируемых одним источником хаоса [20]. Реализации получены с помощью запоминающего осциллографа с частотой оцифровки 2.5 ГГц.

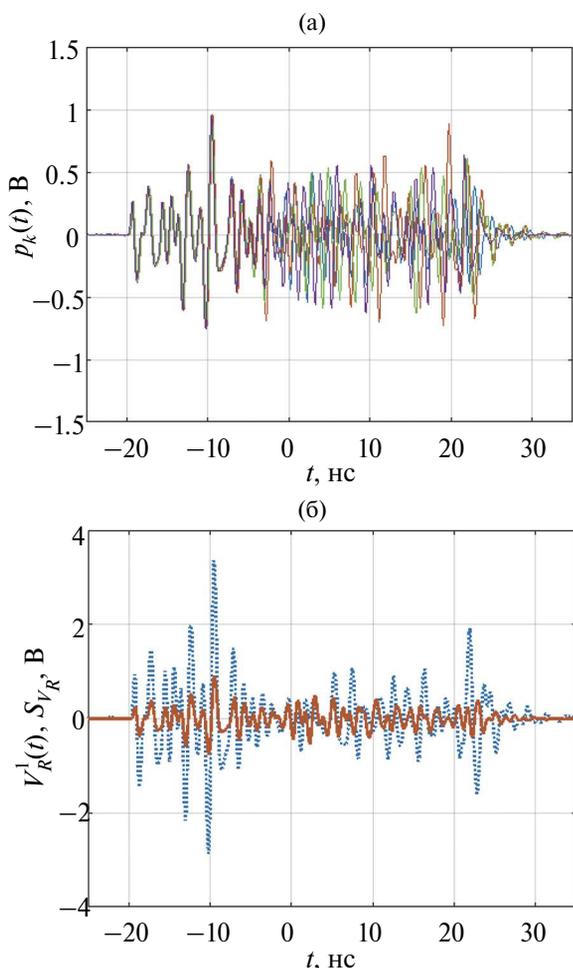


Рис. 3. Реализации хаотических радиоимпульсов (а) от четырех одинаковых генераторов на рис. 1 (кривые 1–4) и результат их сложения (б): исходный импульс (сплошная кривая), их сумма (пунктир).

отношение мощности принятого энергетическим приемником сигнала отличается в M раз для различных участков радиоимпульса.

Опираясь на эти свойства реального хаотического сигнала, в численную модель пространственно-временного суммирования были заложены четыре модельных сигнала.

1. Сигнал “ступенька” — постоянное значение амплитуды на длительности импульса. Этот тип сигнала используется для проверки корректности проведения вычисления в модельных ситуациях, когда результат суммирования может быть однозначно предсказан.

2. Радиоимпульсы, сформированные из фрагментов гармонического сигнала. Этот сигнал используется для сопоставления полученных результатов с опубликованными ранее данными, например, по формированию электромагнитного поля с помощью фазированных излучателей.

3. Радиоимпульсы, сформированные из фрагментов шумоподобного сигнала, полученного с использованием генератора псевдослучайных последовательностей. Такой сигнал представляет собой другой предельный случай, который также позволяет предсказать тот или иной результат сложения в пространстве, так как данный тип импульса имеет дельтообразную автокорреляционную функцию.

4. Радиоимпульсы, являющиеся фрагментами реализации хаотических радиоимпульсов, полученных экспериментально с помощью реальных генераторов хаоса.

3. МОДЕЛЬ СЛОЖЕНИЯ ХАОТИЧЕСКИХ РАДИОИМПУЛЬСОВ В ПРОСТРАНСТВЕ

Модель включает в себя набор источников сигналов (рис. 4), которые изотропно излучают в пространство хаотические СШП-радиоимпульсы. Никаких ограничений на взаимное расположение излучателей не накладывается. Расположение излучателей может быть как упорядоченным, (например, они могут быть равномерно распределены на линии, на плоскости или в пространстве, что представляет собой аналог фазированной антенной решетки), так и полностью неупорядоченным, с произвольным взаимным расположением на линии, на плоскости или в пространстве. Последний вариант на практике может иметь место в составе беспроводной СШП-сети, где расположение беспроводных

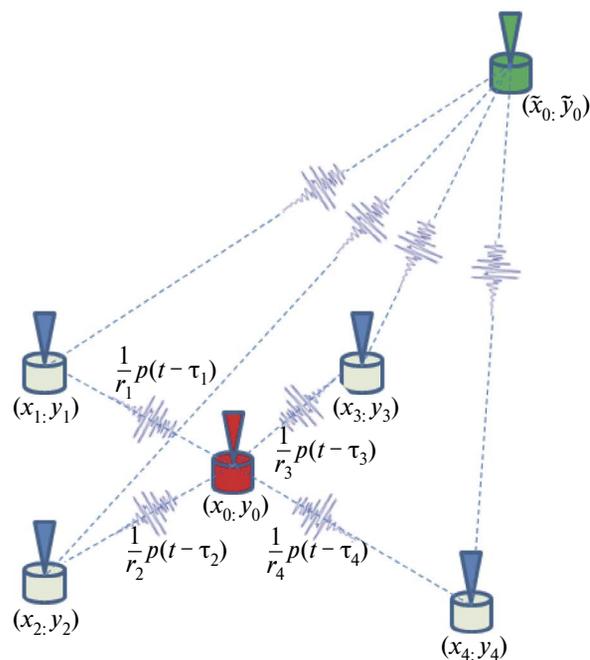


Рис. 4. Схема модели пространственно-временного сложения импульсов: точка приема находится среди группы излучателей и вне группы.

терминалов не предполагает какого-либо заранее заданного пространственного порядка. В литературе подобная неупорядоченная конфигурация узлов сети встречается, например, в распределенных беспроводных сетях с кооперативным поведением или в так называемых распределенных антенных системах.

Рассмотрим модель системы в двух измерениях (на плоскости). Модель включает M излучателей, расположенных в точках с координатами (x_k, y_k) , $k = 1 \dots M$. Каждый излучатель формирует импульсы $p_k(t)$ длительностью T_p , так, что

$$\tau_k - T_p < t < \tau_k,$$

где $\tau_k - T_p$ — момент времени начала излучения хаотического радиоимпульса для каждого из M излучателей, а τ_k — момент окончания излучения радиоимпульса.

Задача модели — рассчитать распределение в пространстве (на плоскости) величины, пропорциональной суммарной энергии хаотических радиоимпульсов, излученных различными источниками. При этом моменты времени излучения радиоимпульсов $\tau_k - T_p$ выбраны таким образом, что в заданную точку с координатами (x_0, y_0) , импульсы приходят когерентно (т.е. передние фронты импульсов, пришедших от разных источников, имеют нулевой сдвиг по времени).

Поскольку понятие фазы у хаотического сигнала не определено, для него нельзя ввести фазовые соотношения, подобно тому как это делается для гармонических сигналов. Поэтому нельзя определить амплитуду суммарного сигнала на основе фазовых соотношений. Имеет смысл рассматривать только величину, пропорциональную энергии сигнала после сложения нескольких хаотических радиоимпульсов, пришедших в точку приема с различными задержками. В данной модели оценивается именно суммарная энергия хаотических радиоимпульсов в качестве показателя их когерентного или некогерентного сложения.

Суммарная энергия импульсов в точке приема (x, y) определяется как

$$E^{(M)}(x, y) = \int_{d_{\min} - T_p}^{d_{\min}} \left(\sum_{k=1}^M \frac{1}{c\Delta_k} p(t - (\tau_k + \Delta_k - d_{\min})) \right)^2 dt \quad (1)$$

где Δ_k — время, которое требуется, чтобы сигнал от k -го источника достиг точки приема,

$$\Delta_k = \frac{1}{c} \|(x, y) - (x_k, y_k)\|, \quad (2)$$

$d_{\min} = \min_{k=1 \dots M} (\tau_k + \Delta_k)$, c — скорость света. Временной интервал, на котором осуществляется интегрирование энергии сигнала, равен длительности

хаотического радиоимпульса. Отсчет этого интервала начинается с момента, когда в точку приема приходит передний фронт первого импульса.

В модели использовалась нормированная величина энергии

$$E_{\text{norm}}^{(M)}(x, y) = \int_{d_{\min} - T_p}^{d_{\min}} \left(\sum_{k=1}^M \frac{\Delta_{\min}}{\Delta_k} p(t - (\tau_k + \Delta_k - d_{\min})) \right)^2 dt, \quad (3)$$

где Δ_{\min} — время распространения радиоимпульса от ближайшего к данной точке (x, y) пространства излучателя. Энергия импульса от ближайшего источника определяется выражением

$$E_{\text{norm}}^{(n)}(x, y) = \int_{d_{\min} - T_p}^{d_{\min}} p^2(t - (\tau_{\min} + \Delta_{\min} - d_{\min})) dt,$$

где τ_{\min} и Δ_{\min} соответствуют ближайшему излучателю.

Интерес представляет отношение $G^{(M)}(x, y)$ суммарной энергии, принятой от M излучателей в точке (x, y) , к энергии радиоимпульса, пришедшего от ближайшего по расстоянию источника

$$G^{(M)}(x, y) = E_{\text{norm}}^{(M)}(x, y) / E_{\text{norm}}^{(n)}(x, y). \quad (4)$$

Естественным геометрическим масштабом модели является длина волны λ_c хаотического СШП-радиоимпульса, которая определяется через среднее геометрическое частоты СШП-сигнала [45]:

$$f_c = \sqrt{f_1 f_2},$$

где f_1 — нижняя частота СШП-диапазона, а f_2 — верхняя.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Пример расчетов, сделанный с использованием этой модели, приведен на рис. 5, 6.

В модели используется четыре излучателя, расположенные в вершинах квадрата с координатами (x_k, y_k) : $(20\lambda_c; 20\lambda_c)$, $(-20\lambda_c; 20\lambda_c)$, $(-20\lambda_c; -20\lambda_c)$, $(20\lambda_c; -20\lambda_c)$.

Рассматривались два типа сценариев: расположение точки приема между источниками и вдалеке от группы источников (при этом расстояние до ближайшего источника составляет несколько десятков длин волн).

Каждый из этих сценариев рассматривался для трех типов сигналов: гармонического, псевдослучайного и хаотического.

Результаты моделирования (распределение величины $G^{(4)}$) для различных типов сценариев представлены на рис. 5, где точка приема находится внутри группы излучателей, а на рис. 6 — вне этой группы. Моменты начала излучения импульсов τ_k , $k = 1 \dots 4$, для каждого источника были выбраны

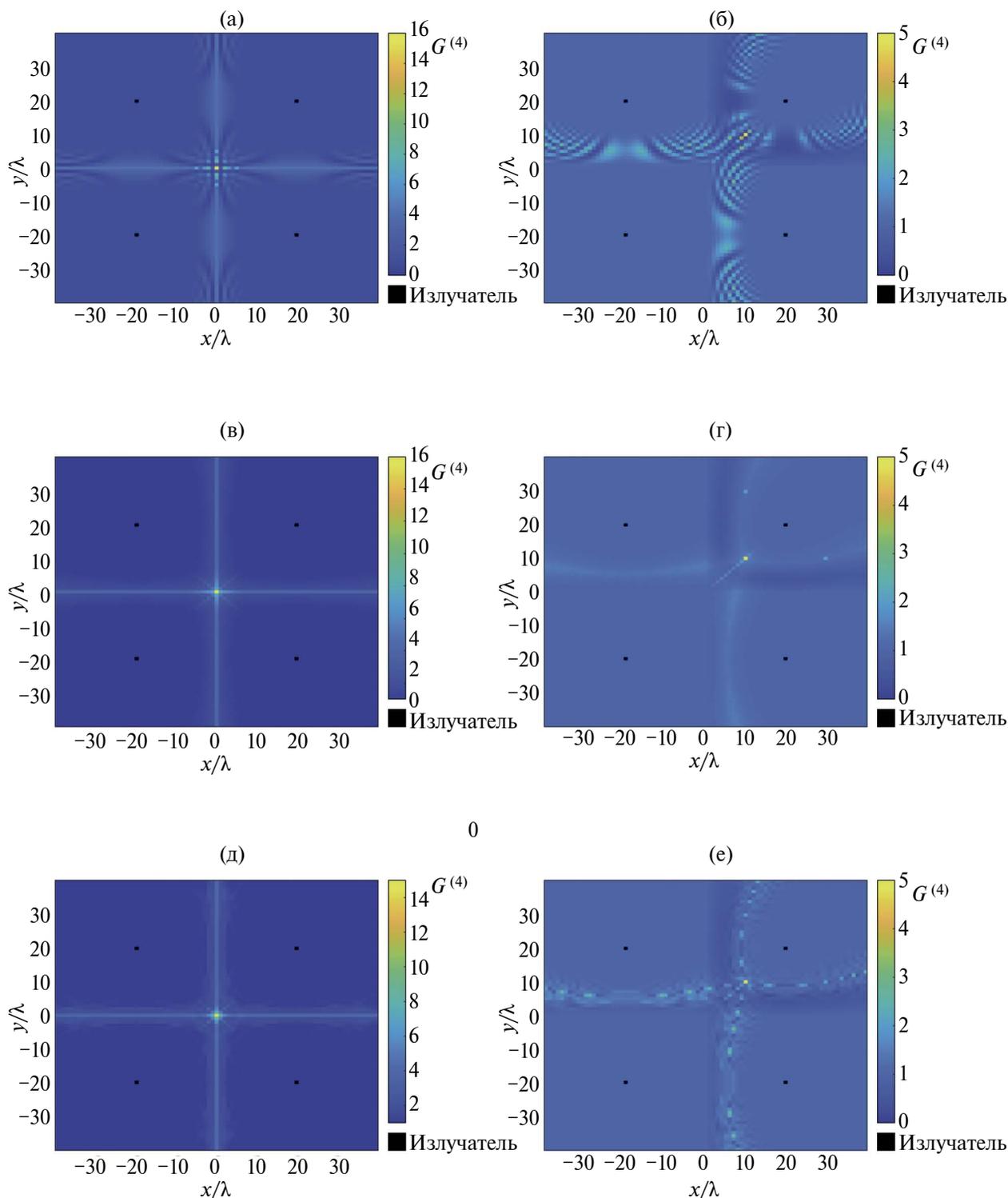


Рис. 5. Распределение значений $G^{(4)}$ на плоскости от четырех независимых излучателей, когда точка приема находится вне группы излучателей: (а), (б) — гармонического сигнала, (в), (г) — сигнала от генератора псевдослучайных чисел, (д), (е) — реальных хаотических радиоимпульсов; характерная длительность импульса 10 длин волн; $x = 0$, $y = 0$ (а, в, д), $x = 10$, $y = 10$ (б, г, е).

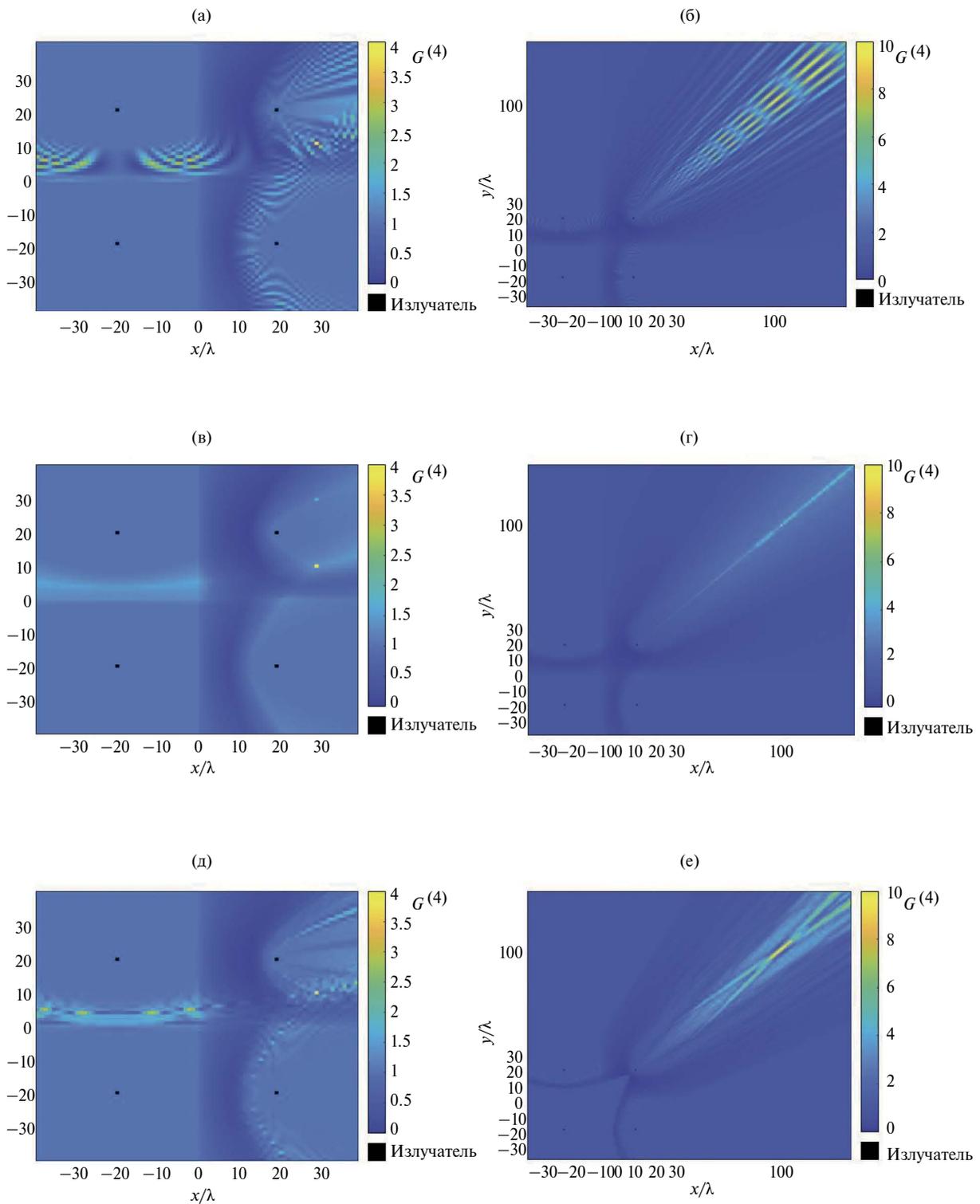


Рис. 6. Распределение значений $G^{(4)}$ на плоскости от четырех независимых излучателей в ситуации, когда точка приема находится среди группы излучателей: (а), (б) — гармонического сигнала, (в), (г) — сигнала от генератора псевдослучайных чисел, (д), (е) — реальных хаотических радиоимпульсов; характерная длительность импульса 10 длин волн (λ); $x = 30, y = 10$ (а, в, д), $x = 100, y = 100$ (б, г, е).

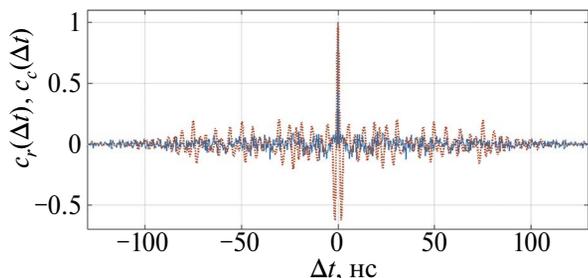


Рис 7. Автокорреляционная функция $c_r(\Delta t)$ для радиоимпульса из псевдослучайного сигнала (штриховая) и $c_c(\Delta t)$ для хаотического радиоимпульса (сплошная).

таким образом, чтобы в точку приема (x_0, y_0) все импульсы приходили одновременно.

Ожидаемые и полученные результаты моделирования для всех типов сигналов показывают, что имеется: область, где мощность сигнала определяется результатом сложения амплитуд; переходная область, где мощность импульсов складывается некогерентно с различными сдвигами друг относительно друга; область, где не происходит наложения импульсных сигналов друг на друга так, что ожидаемая мощность равна мощности каждого импульса по отдельности.

Для импульса с наполнением из гармонического сигнала наблюдается ожидаемая интерференционная картина в виде периодического чередования максимумов и минимумов.

Для сигнала от генератора псевдослучайных чисел пятно фокуса сужается, что объясняется дельтообразной автокорреляционной функцией псевдослучайного сигнала (рис. 7). Для хаотического сигнала, автокорреляционная функция которого приведена на рис. 7, ситуация подобна псевдослучайному сигналу, но пятно фокуса имеет более размытый вид.

В ситуации, когда точка фокуса находится внутри группы излучателей или вблизи ее границ, пятно фокуса становится более узким в окрестности точки фокуса. Это объясняется тем, что удваивается нарастание разности моментов прихода сигналов от различных источников в точки, отличные от точки фокуса, если точка фокуса находится внутри группы.

По мере удаления от границ группы, пятно вытягивается вдоль линии, задающей направления от точки фокуса к группе излучателей.

Для всех трех типов сигнала помимо основного максимума, находящегося в точке приема, существуют области пространства, в которых также осуществляется когерентное сложение от трех и от двух источников, но с меньшей амплитудой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описана модель когерентного сложения хаотических СШП-радиоимпульсов в пространстве: введена количественная мера, характеризующая изменение энергии вследствие сложения множества хаотических СШП-радиоимпульсов в точке приема; установлены базовые закономерности, которым подчиняется такое сложение; разработана численная модель, которая позволяет имитировать сложение хаотических радиоимпульсов при различных взаимных расположениях излучателей импульсов и приемника хаотических СШП-радиоимпульсов. Были получены распределения суммарной энергии импульсов в ситуации, когда расстояние до точки приема много больше характерного размера группы излучателей, и в ситуации, когда точка приема находится между излучателями. Последнее представляет интерес для практических приложений пространственного разделения пользователей, в задачах беспроводной передачи информации.

Полученные результаты предполагается использовать при проведении экспериментальных исследований по когерентному излучению и приему хаотических СШП-радиоимпульсов.

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00297).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang M., Gao F., Jin S., Lin H. // IEEE J. Selected Topics in Signal Processing. 2019. V. 13. P. 886. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2019.2934931>
2. Ning B., Tian Z., Mei W. et al. // IEEE Open J. Commun. Society. 2023. V. 4. P. 614. <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2023.3245669>
3. Huo Y., Lin X., Di B. et al. // Sensors. 2023. V. 23. <https://doi.org/10.3390/s23136062>
4. Cui H., Liu Y. // China Commun. 2019. V. 16. P. 70. <https://doi.org/10.23919/JCC.2019.11.006>
5. Zhu Y.H., Monteyne L., Callebaut G. et al. // Proc. IEEE94th Vehicular Technology Conf. (VTC2021-Fall). Norman. 27–30 Sep. 2021. N.Y.: IEEE, 2021. Article No. 9625546. <https://doi.org/10.1109/VTC2021-Fall52928.2021.9625546>
6. Sendonaris A., Erkip E., Aazhang B. // IEEE Trans. 2003. V. COM-51. № 11 P. 1927. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2003.818096>
7. Sendonaris A., Erkip E., Aazhang B. // IEEE Trans. 2003. V. COM-51. № 11 P. 1939. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2003.819238>

8. *Bletsas A., Khisti A., Reed D., Lippman A.* // IEEE J. Selected Areas in Commun. 2006. V. 24. P. 659. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2005.862417>
9. *Dai L., Zhou S., Yao Y.* // IEEE Trans. 2005. V. WC-4. № 6. P. 2613. <https://doi.org/10.1109/TWC.2005.858011>
10. *Bucher S., Ragab A.N., Yammine G. et al.* // Proc. 15th Int. Symp. on Wireless Commun. Systems (ISWCS). Lisbon, Portugal. 28–31 August 2018. P. 1. <https://doi.org/10.1109/ISWCS.2018.8491104>
11. *Schenk A., Fischer R.F.H.* // Proc. 17th Int. ITG Workshop on Smart Antennas (WSA-2013). Stuttgart. 13–14 March 2013. Berlin: VDE Verlag GmbH, 2013. Paper No. 3. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6780655>
12. *Stierstorfer C., Fischer R.F.H., Yammine G.* // Proc. 19th Int. ITG Workshop on Smart Antennas (WSA-2015). Ilmenau. 03–05 March 2015. Berlin: VDE Verlag GmbH, 2015. Paper No. 21. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7051816>
13. *Shishlov A., Denisenko V., Levitan B. et al.* // J. Radio Electronics. 2022. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.1.5>
14. *Bohata J., Lonský T., Spáčil J. et al.* // Proc. 12th Int. Symp. on Commun. Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP). Porto. 20–22 Jul. 2020. N.Y.: IEEE, 2020. Article No. 9249587. <https://doi.org/10.1109/CSNDSP49049.2020.9249587>
15. *Juzvik D., Stepanov M.* // J. Radio Electronics. 2022. № 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.17>
16. *Zhang H., Shlezinger N., Guidi F. et al.* // IEEE Commun. Magazine. 2023. V. 61. P. 72. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2200259>
17. *Abel A., Schwarz W.* // Proc. IEEE. 2002. V. 90. P. 691. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2002.1015002>
18. *Dmitriev A., Ryzhov A., Sierra-Teran C.* // Electronics. 2023. V. 12. P. 1495. <https://doi.org/10.3390/electronics12061495>
19. *Kuzmin L.V., Efremova E.V.* // Electronics. 2023. V. 12. P. 1324. <https://doi.org/10.3390/electronics12061324>
20. *Kuzmin L.V., Efremova E.V., Itskov V.V.* // Sensors. 2023. V. 23. P. 6864. <https://doi.org/10.3390/s23156864>
21. *Efremova E.V., Kuzmin L.V., Itskov V.V.* // Electronics. 2023. V. 12. P. 4425. <https://doi.org/10.3390/electronics12214425>
22. *Kaddoum G., Vu M., Gagnon F.* // Proc. IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems (ISCAS). Seoul. 20–23 May 2012. N.Y.: IEEE, 2012. P. 157. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2012.6271552>
23. *Kirutiga M., Narayan K., Chinmayi A.* // Proc. Int. Conf. on Commun. and Signal Processing (ICCSP). Melmaruvathur. 02–04 April 2015. P. 1690. <https://doi.org/10.1109/ICCSP.2015.7322807>
24. *Gardill M., Weigel R., Koelpin A.* // Proc. 8th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP 2014). The Hague. 06–11 April 2014. N.Y.: IEEE, 2014. P. 3629. <https://doi.org/10.1109/EuCAP.2014.6902616>
25. *Savostin V.S., Gevorkyan A.V.* // Proc. Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). Divnomorskoe, Russia. 26–30 June 2023. P. 420. <https://doi.org/10.1109/RSEMW58451.2023.10202131>
26. *Jin Y., Jiang Y., Moura J.M.F.* // Proc. IEEE GLOBECOM 2007 — IEEE Global Telecommun. Conf. Washington. 26–30 Nov. 2007. N.Y.: IEEE, 2007. P. 3029. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2007.574>
27. *Kareemulla S., Kumar V.* // Proc. IEEE Int. Conf. on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES). Kozhikode. 19–21 Feb. 2015. N.Y.: IEEE, 2015. Article No. 7091535. <https://doi.org/10.1109/SPICES.2015.7091539>
28. *Agnihotri N., Kantemur A., Tak J., Xin H.* // Proc. IEEE Int. Symp. on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Sci. Meeting. Atlanta. 07–12 July 2019. N.Y.: IEEE, 2019. P. 2039. <https://doi.org/10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8888569>
29. *Huang H.Y., Chu Q.X.* // Proc. IEEE Int. Symp. on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Sci. Meeting (APS/URSI). Singapore, 04–10 Dec. 2021. P. 991. <https://doi.org/10.1109/APS/URSI47566.2021.9704538>
30. *Ramasamy R., Rajkumar R., Sellapillai S. et al.* // Proc. Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT). Kuala Lumpur. 27–29 Nov. 2021. P. 1. <https://doi.org/10.1109/i-PACT52855.2021.9696938>
31. *Sharma M., Haque M.J., Sharma B.* // Proc. 2nd Int. Conf. on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE). Greater Noida. 28–29 Apr. 2022. P. 1256. <https://doi.org/10.1109/ICACITE53722.2022.9823501>
32. *Shome P.P., Khan T., Kishk A.A., Antar Y.M.M.* // IEEE Internet of Things J. 2023. V. 10. P. 17964. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3280628>
33. *Shahriari S., Choi Y., Eshraghi A. et al.* // Proc. 4th Int. Conf. on Recent Advances in Space Technologies. Istanbul. 11–13 Jun 2009. P. 477. <https://doi.org/10.1109/RAST.2009.5158245>
34. *Panduro M.A., Mendez A.L., Dominguez R., Romero G.* // AEU — Int. J. Electronics and Communications. 2006. V. 60. P. 713. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2006.03.006>
35. *Varum T., Matos J.N., Pinho P., Abreu R.* // Proc. 9th Europ. Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP). Lisbon, Portugal. 13–17 April 2015. P. 1.
36. *Tuan S.C.* // Proc. 12th Int. Symp. on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). Hangzhou. 03–06 December 2018. P. 1. <https://doi.org/10.1109/ISAPE.2018.8634041>

37. *Abdesalam M., Ordonez R.* // Proc. IEEE Int. Symp. on Intelligent Control (ISIC). Buenos Aires. 19–22 Sep. 2016. N.Y.: IEEE, 2016. Article No. 7579978. <https://doi.org/10.1109/ISIC.2016.7579978>
38. *Andreyev Y.V.* // Proc. Russian Open Conf. on Radio Wave Propagation (RWP). Kazan. 01–06 July 2019. V. 1. P. 364. <https://doi.org/10.1109/RWP.2019.8810209>
39. *Dmitriev A.S., Efremova E.V., Ryzhov A.I. et al.* // Chaos. 2021. V. 31. P. 063135.
40. *Дмитриев А.С., Петросян М.М., Рыжов А.И.* // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. № 12. С. 38. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.12.51066>
41. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Кузьмин Л.В.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. № 22. С. 29.
42. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Кузьмин Л.В., Атанов Н.В.* // РЭ. 2006. Т. 51. № 5. С. 593.
43. *Dmitriev A.S., Efremova E.V., Kuzmin L.V., Atanov N.V.* // Int. J. Bifurcation and Chaos. 2007. V. 17. P. 3443. <https://doi.org/10.1142/S0218127407019184>
44. *Кузьмин Л.В., Ефремова Е.В., Ицков В.В., Зубков А.С.* // РЭ. 2023. Т. 68. № 12. P. 1178.
45. *Miller L.E.* Why UWB? A Review of Ultrawideband Technology. Technical Report for NETEX Project Office, DARPA. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology; 2003. 78 p. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=ba9a96c36b1c6d1f18f04b8371cb126d0d257e30>

MODEL OF SPATIOTEMPORAL COHERENT SUMMATION OF ULTRA-WIDEBAND CHAOTIC RADIO PULSES FORMED BY INDEPENDENT EMITTERS

A. S. Zubkov^{a, b}, L. V. Kuzmin^{a, *}, E. V. Efremova^a

^a*Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Mokhovaya st., 11–7, Moscow, 125009 Russian Federation*

^b*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701 Russian Federation*

^{*}*E-mail: lvkuzmin@gmail.com*

Received November 10, 2023; revised March 19, 2024; accepted March 26, 2024

A model of spatiotemporal summation of ultra-wideband chaotic radio pulses is proposed. The feasibility of using this model for analyzing scenarios of time-coherent radiation from independent sources of ultra-wideband chaotic radio pulses in wireless ultra-wideband systems is substantiated. Two scenarios are considered: where the distance between receiving point and emitters is much greater than the typical size of a group of emitters and where the receiving point is located between the emitters. Distributions of the total pulse energy in space for these scenarios are obtained.

Keywords: ultra-wideband signals, chaotic signals, coherent processing of chaotic signals, generation of chaotic signals