



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.22>

УДК: 621.396

## МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ ПОЛЕЗНЫЙ СИГНАЛ/ПОМЕХА В СЕТИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКОВ

А.С. Зубков<sup>1,2</sup>, Л.В. Кузьмин<sup>1</sup>, Е.В. Ефремова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп. 9.

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)  
141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 25 июля 2024 г.

**Аннотация.** В работе предлагается и анализируется модель, описывающая пространственное распределение отношения полезный сигнал/помеха в сети из кооперативно взаимодействующих сверхширокополосных приёмопередатчиков, находящихся в общей области радиовидимости. Модель включает одну группу устройств, обменивающихся полезным сигналом, и две группы устройств, являющихся источником сигналов, играющих роль помехи по отношению к первой. Оценивается отношение мощности полезного сигнала первой группы, к совокупной мощности помеховых сигналов, которые излучают устройства двух других групп. Устанавливаются пространственные границы, в пределах которых отношение полезный/помеховый сигнал не меньше заданного значения.

**Ключевые слова:** сверхширокополосные хаотические радиоимпульсы, сверхширокополосные сигналы, хаотические сигналы, когерентное излучение хаотических сигналов, когерентный прием.

**Финансирование:** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант №. 23-29-00297

**Автор для переписки:** Зубков Александр Сергеевич, [alse@zubkov.one](mailto:alse@zubkov.one)

## Введение

Кооперативное взаимодействие беспроводных устройств естественным образом возникает в задачах беспроводных коммуникаций, в которых необходимо пространственно-временное разделение сигналов. Это могут быть либо сети сотовой связи, локальные беспроводные сети, либо многоантенные системы (MIMO, или сверхбольшие многоантенные системы – Extra Large MIMO), где необходимо обеспечить пространственно-временное разделение потоков информации [1,2]. За счет такого разделения достигается многократное использование спектра и максимизируется отношение числа бит на герц, что повышает эффективность использования пространственно-временных ресурсов. Применение и возможные архитектуры такого рода приемопередающих систем, а также трудности и проблемы, пока ещё только обсуждаются на уровне их потенциальных характеристик в перспективных беспроводных системах связи следующих поколений [1].

Тенденция такова, что размеры распределённой беспроводной системы становятся сопоставимы или больше характерных расстояний, на которые предполагается передавать информацию [3,4]. Точка приема (например, абонентский терминал) может располагаться как среди элементов системы (в ближней зоне), так и вдали от них (в дальней зоне). Отсюда возникает специфический набор проблем, которые обсуждаются в литературе: каким образом построить системы, которые одинаково эффективно работали бы и в ближней, и в дальней зоне [5-7]. При этом анализ возможностей применения подобных систем ведётся в приближении узкополосных сигналов, в рамках которого и решаются те или иные задачи синтеза диаграмм направленности распределённых беспроводных систем.

В этой связи интересно проанализировать возможности, которые даёт применение сверхширокополосных (СШП) сигналов, а именно применение СШП хаотических радиоимпульсов. Такого рода сигналы можно получать при помощи технически-простых устройств в практически любом частотном диапазоне. В настоящее время имеется теория и практика их применения в беспроводных системах и сетях связи, наработаны необходимые программно-аппаратные решения [8]. Данный тип сигналов введен в ряд международных стандартов беспроводной радиосвязи [9].

По отношению к УП сигналам СШП сигналы – это альтернативный подход, который предполагает использование электромагнитного (ЭМ) спектра на вторичной основе [10-13] без необходимости координации работы СШП устройств с УП устройствами.

В фактически сложившейся практики использования СШП систем отсутствует стремление к максимизации числа бит на герц (речь, напротив, идет о системах, "неэффективно" использующих частотный ресурс), и упор делается на ЭМ совместимость приема-передающих устройств между собой и на достижение как можно большей помехоустойчивости по отношению к помехам разных типов, чтобы устройства, находящиеся в зоне общей радиовидимости, могли осуществлять одновременную передачу информации. СШП устройства предназначены для массового применения на расстояниях до нескольких десятков метров (сотни длин волн), и задача нескоординированной передачи информации между отдельными устройствами или между группами конкурирующих за радиоресурс устройств возникает естественным образом.

В сверхширокополосных системах возможна реализация полного пространственно-временного разделения пользователей [14-16] за счет временного разделения, но при такой постановке фактически искажается идея СШП как средства, обеспечивающего ЭМ совместимость без применения специальных алгоритмов частотно-временного доступа. Если отказаться от применения алгоритмов временного доступа, то достичь полного отсутствия взаимных помех невозможно, поэтому необходим ответ на вопрос,

какого отношения сигнал-помеха можно достичь при различных пространственных конфигурациях СШП устройств, находящихся в общей зоне радиовидимости?

Цель работы – предложить и проанализировать одну из таких моделей, где имеется три группы устройств: в первой группе устройства обмениваются между собой полезными сигналами, координируя моменты их излучения и приема так, чтобы обеспечить одновременный приход хаотических радиоимпульсов в заданную точку пространства; устройства второй и третьей группы служат источником СШП помеховых сигналов по отношению к устройствам первой (рис. 1). Данная модель необходима, чтобы в дальнейшем поставить задачу моделирования передачи независимых потоков данных между группами конкурирующих устройств, находящихся в общей зоне радиовидимости.

Интерес представляет пространственное распределение отношения полезный сигнал/сигнал-помеха при различных взаимных расположениях устройств в каждой группы. Данная задача решается при следующих предположениях:

- а) в качестве радиосигналов используются СШП хаотические радиоимпульсы [11,12];
- б) обеспечивается возможность когерентного сложения таких радиоимпульсов в заданной точке пространства [17,18];
- в) на местоположение излучателей и на моменты излучения ими импульсов не накладывается никаких ограничений.

Ключевым в данной постановке является возможность генерации устройствами импульсов с одинаковой формой, что позволяет реализовать когерентное сложение сигналов от разных устройств в заданной точке пространства [17,18]. Последнее необходимо для увеличения отношения сигнал/шум. Принципиальная возможность этого была показана в [12, 19-21]. Когерентное сложение увеличивает отношение сигнал/шум пропорционально

квадрату числа устройств, участвующих в когерентном сложении, что очень привлекательно для различных практических приложений.

Без соблюдения условий на форму импульсов и на моменты их излучения реализуется естественное некогерентное сложение хаотических сигналов, вопросы распределения мощности которых в пространстве для набора излучателей рассматривались в [22].

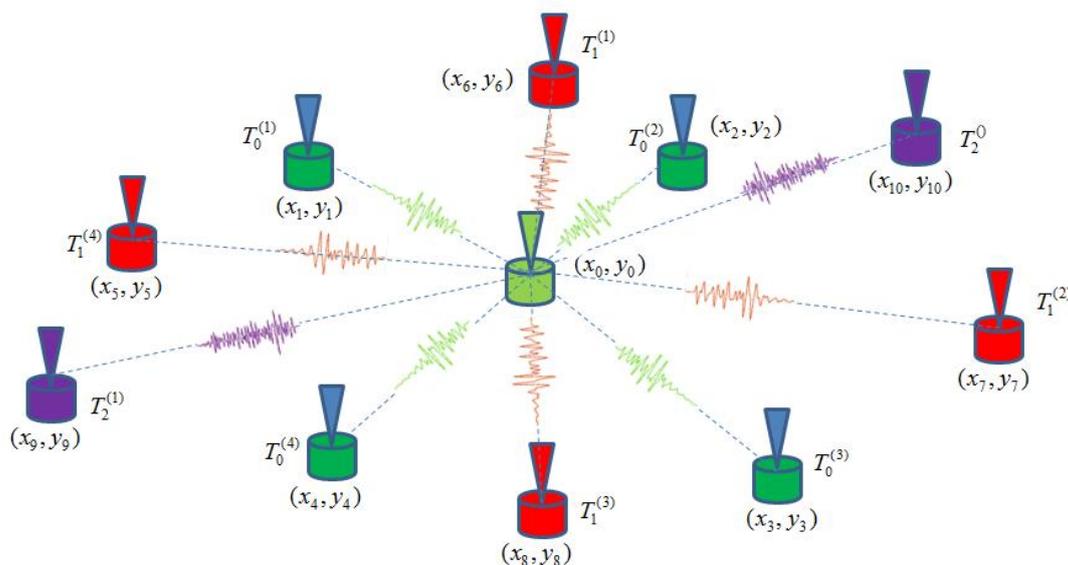


Рис. 1. Структура модели сложения СШП хаотических радиоимпульсов в точке  $(x_0, y_0)$  от трех групп устройств: группа  $M_0$  (зеленый,  $T_0^{(1)}, T_0^{(2)}, T_0^{(3)}, T_0^{(4)}$ ) – источники полезных сигналов; группа  $M_1$  (красный,  $T_1^{(1)}, T_1^{(2)}, T_1^{(3)}, T_1^{(4)}$ ) – излучает сигналы в когерентном режиме по отношению к точке приема  $(x_0, y_0)$ , является источником помеховых сигналов для группы  $M_0$ ; и группа  $M_2$  (фиолетовый  $T_2^{(1)}, T_2^{(2)}, T_2^{(3)}, T_2^{(4)}$ ) создает помехи первой группе в некогерентном режиме.

## 1. Модели сигналов

Анализ характеристик предлагаемой модели основан на свойствах сигналов, полученных от реальных устройств – генераторов хаоса [12].

Как было показано в [12, 19-21] в процессе генерации хаотических радиоимпульсов в начале каждого хаотического радиоимпульса имеется участок, который одинаков у всех радиоимпульсов данного экземпляра генератора. Различные экземпляры конструктивно идентичных хаотических

генераторов, также будут генерировать хаотические радиоимпульсы с совпадающим начальным участком [12]. Если ограничить длительность импульса длительностью начального участка, то возможна генерация совпадающих импульсов, форму которых можно изменять, варьируя напряжение питания генератора. За пределами начального участка, где колебания расходятся (см. рис. 1б), генератор можно использовать как источник шумоподобных колебаний. Таким образом применение источников СШП хаотических радиоимпульсов потенциально обеспечивает обмен информации как в когерентном, так и в некогерентном режиме.

Предлагаемая модель включает три группы устройств, поэтому были выбраны три типа сигналов: для первой группы устройств выбраны хаотические радиоимпульсы с формой  $s_0$  (рис. 2а, синяя кривая); для второй группы – хаотические радиоимпульсы с формой  $s_1$  (рис. 2а, красная кривая); для третьей –  $s_2$  (рис. 2б).

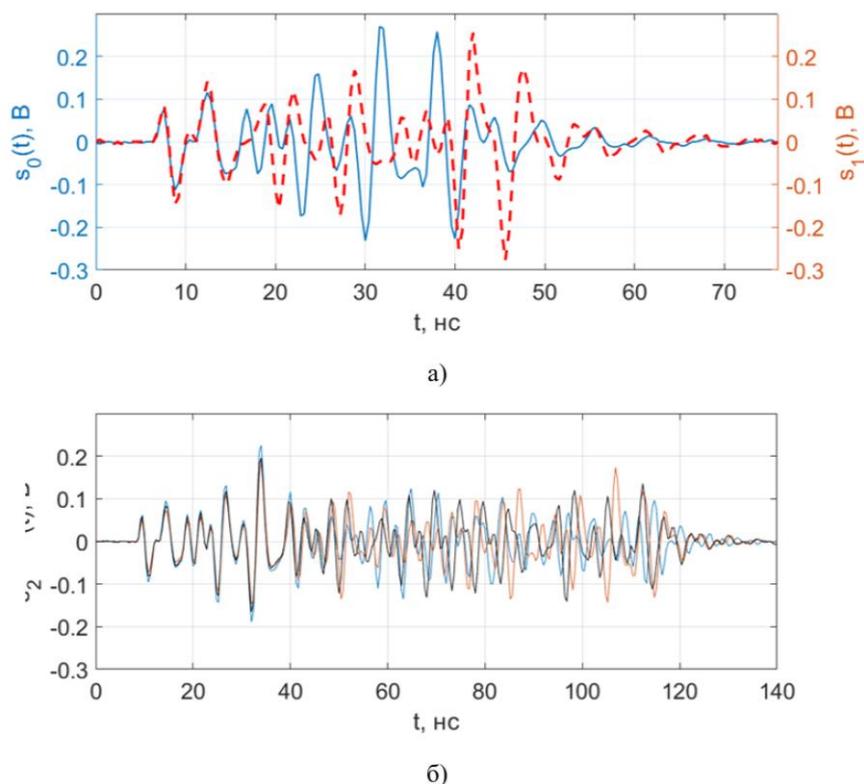


Рис. 2. Формы сигналов трех типов радиоимпульсов: для первой и второй группы устройств,  $s_0$  (сплошной синий, левая шкала) и  $s_1$  (штриховой красный, правая шкала), соответственно (а); и (б) примеры реализации трех импульсов  $s_2^{(1,2,3)}$  для третьей группы устройств.

Кросс- и автокорреляционные функции для радиоимпульсов с формой  $s_0$ ,  $s_1$  и  $s_2$  приведены на рис. 3: на рис. 3а для сигналов  $s_0$  и  $s_1$ , а на рис.3б – авто- и кросскорреляции для пар сигналов  $s_0$  и  $s_1$ ,  $s_0$  и  $s_2$ .

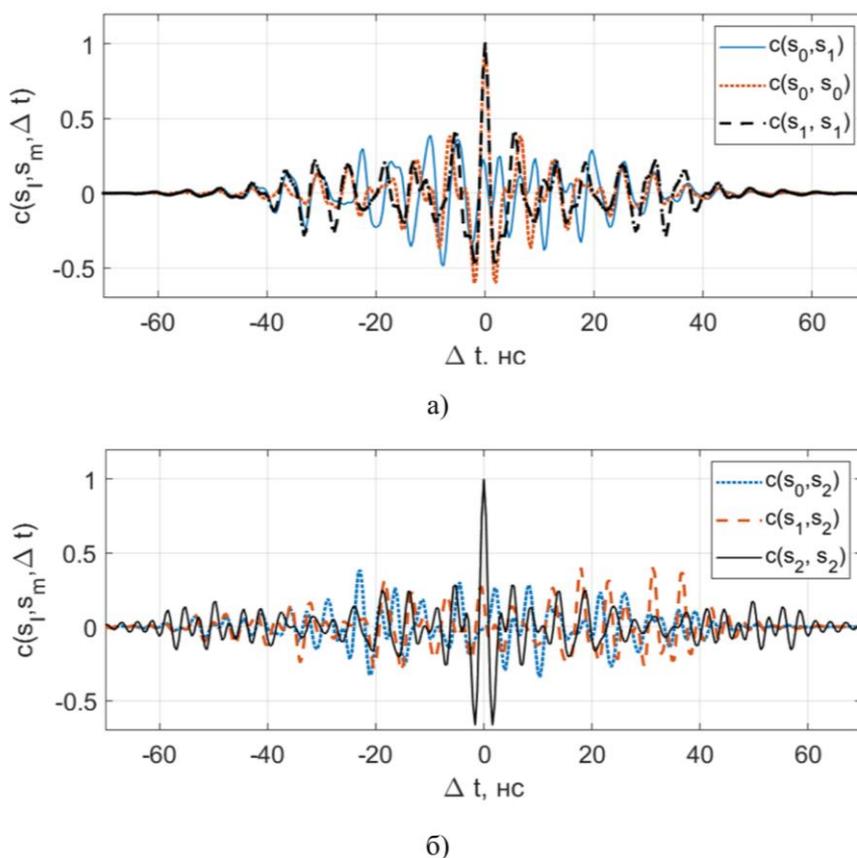


Рис. 3. Корреляционные функции  $c(\Delta t)$ : а – для сигналов  $s_0$  и  $s_1$  (синяя сплошная), автокорреляционная функция для сигналов  $s_0$  (красные точки) и  $s_1$  (черный пунктир); и б – для сигналов  $s_0$  и  $s_2$  (синие точки),  $s_1$  и  $s_2$  (красный пунктир), автокорреляционная функция для сигнала  $s_2$  (черный сплошной).

## 2. Численная модель системы

Модель включает  $K$  источников, расположенных на плоскости, каждый из которых имеет координаты  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1 \dots K$ . Источники делятся на три группы: группы  $M_0$ , состоящая из  $m_0$  устройств, которые согласованно излучают импульсы с одинаковой формой, одновременно приходящие в заданную точку с координатами  $(x_0, y_0)$ ; группа  $M_1$ , состоящая из  $m_1$  устройств, в которой источники также когерентно в пределах своей группы излучают сигналы в ту же точку приема с координатами  $(x_0, y_0)$ , однако сигналы от данной группы

играют роль сигналов-помех, некоррелированных с полезным сигналом группа  $M_0$ ; группа  $M_2$ , состоящая из  $m_2$  устройств, источники которой излучают хаотические радиопульсы несогласованно как между собой, так и по отношению к излучателям из двух других групп.

В точке приема  $(x_0, y_0)$  формируется суммарный сигнал: когерентно сложенные импульсы от группы  $M_0$ , когерентно сложенные между собой импульсы от группы  $M_1$ , и некогерентно сложенные (как между собой, так и по отношению к устройствам из других групп) импульсы от устройств из группы  $M_3$ .

В модели излучаемые гналы имеют одинаковую мощность. Для импульсов длительности  $T$  в точке приема  $(x_0, y_0)$  в момент времени  $t_0$  имеем сумму сигналов:

$$s(t_0) = s_0(t_0) \sum_{i=1}^{m_0} r_i^{-1} + s_1(t_0) \sum_{j=1}^{m_1} r_j^{-1} + \sum_{k=1}^{m_2} \frac{s_{2,k}(t_0 - \tau_k)}{r_k}, \quad (1)$$

где  $s_{2,k}$  – импульсы от устройств третьей группы,  $\tau_k$  — пространственная задержка распространения от  $k$ -го источника из третьей группы до точки приема  $(x_0, y_0)$ ,  $r_i$  — расстояние в длинах волн от  $i$ -го источника до точки приема. Здесь предполагается, что моменты излучения импульсов  $s_0$  и  $s_1$  устройствами первой и второй группы подобраны так, что они складываются в точке  $(x_0, y_0)$  в момент времени  $t_0$  когерентно, поэтому в явном виде пространственная задержка распространения для них не указана. Расчет пространственной задержки распространения описывается моделью [23,24].

Амплитуда импульсов с увеличением расстояния  $r$  от излучателя затухает пропорционально  $1/r$  (аналог распространения в свободном пространстве).

Меняя положение точки приема  $(x_0, y_0)$  можно определить границы областей, в пределах которых мощность  $P_0$  суммарного сигнала от источников группы  $M_0$  превышает мощность суммарных сигналов от источников

групп  $M_1$  и  $M_2$  (мощности  $P_1$  и  $P_2$  соответственно) в заданное число раз:  
 $G = P_0 / (P_1 + P_2)$ .

Далее предполагается, что пространственно-геометрические соотношения модели (координаты устройств  $(x_i, y_i)$ , координаты точки приема  $(x_0, y_0)$ , расстояния  $r_i$  от устройств до точки приема) выражены в длинах волн СШП хаотического радиоимпульса, соответствующего среднегеометрической частоте СШП сигнала:  $f = \sqrt{f_n f_g}$ ,  $\lambda = c/f$ , где  $c$  – скорость света  $f_n$  – нижняя граница, а  $f_g$  – верхняя граница частотного диапазона СШП сигнала.

### 3. Оценка отношения сигнал-помеха

Мощность суммарного сигнала (1) в пределах длительности импульса  $T$  в точке приема пропорциональна величине:

$$P^{(T)} = \frac{1}{T} \int_{t_0-T}^{t_0} s^2(\tau) d\tau. \quad (2)$$

Когерентное суммирование (1) сигналов в точке приема дает сложение по амплитуде, и их среднеквадратичная амплитуда растет пропорциональна числу излучателей [12,18,23]. При некогерентном сложении пропорционально числу излучателей растет мощность.

После возведения суммарного сигнала (1) в квадрат получим многочлен относительно сигналов  $s_0, s_1$  и  $s_2$  с квадратичными и перекрестными членами.

$$P^{(T)} = P_{M_0}^{(T)} + P_{M_1}^{(T)} + P_{M_2}^{(T)} + P_{M_0M_1}^{(T)} + P_{M_0M_2}^{(T)} + P_{M_1M_2}^{(T)}, \quad (3a)$$

где:

$$P_{M_0}^{(T)} = \frac{1}{T} \int_0^T \left( s_{M_0}(t_0) \sum_{i=1}^{m_0} r_i^{-1} \right)^2 dt; \quad (4a)$$

$$P_{M_1}^{(T)} = \frac{1}{T} \int_0^T \left( s_{M_1}(t_0) \sum_{j=1}^{m_1} r_j^{-1} \right)^2 dt; \quad (4b)$$

$$P_{M_2}^{(T)} = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^{m_2} \int_0^T \left( \frac{s_k(t_0 - \tau_k)}{r_k} \right)^2 dt ; \quad (4B)$$

$$P_{M_0M_1}^{(T)} = \frac{2}{T} \int_0^T \left( s_0(t_0) s_1(t_0) \left( \sum_{i=1}^{m_0} r_i^{-1} \right) \left( \sum_{j=1}^{m_1} r_j^{-1} \right) \right) dt ; \quad (4Г)$$

$$P_{M_0M_2}^{(T)} = \frac{2}{T} \int_0^T \left( s_0(t_0) \left( \sum_{i=1}^{m_0} r_i^{-1} \right) \sum_{k=1}^{m_2} \frac{s_{2,k}(t_0 - \tau_k)}{r_k} \right) dt ; \quad (4Д)$$

$$P_{M_1M_2}^{(T)} = \frac{2}{T} \int_0^T \left( s_1(t_0) \left( \sum_{j=1}^{m_1} r_j^{-1} \right) \sum_{k=1}^{m_2} \frac{s_{2,k}(t_0 - \tau_k)}{r_k} \right) dt . \quad (4е)$$

Интеграл от перекрестных произведений (4 г,д,е) близок к нулю. Это подтверждается прямыми расчетами на примере реальных хаотических радиоимпульсов, изображенных на рисунке 2. Величины (4г), (4д), (4е) пропорциональны значениям кросскорреляционных функций (рис. 3) сигналов  $s_0$ ,  $s_1$  и  $s_2$ , взятыми в соответствующие моменты, определяемые взаимными сдвигами по времени между сигналами. Значения  $P_{M_0M_2}^{(T)}$  (4д),  $P_{M_1M_2}^{(T)}$  (4е) стремятся к нулю по мере роста числа источников импульсов в группах.

Таким образом, с хорошей точностью можно считать, что при вычислении мощности суммарного импульса (3) основной вклад вносят лишь квадратичные члены (4 а,б,в):

$$P^{(T)} \approx P_{M_0}^{(T)} + P_{M_1}^{(T)} + P_{M_2}^{(T)} . \quad (5)$$

В этой ситуации имеет смысл ввести отношение мощности полезный сигнал/сумма помеховых сигналов:

$$G = \frac{P_{M_0}^{(T)}}{P_{M_1}^{(T)} + P_{M_2}^{(T)}} , \quad (6)$$

как меру, которая покажет распределение отношения (6) полезного и помехового сигнала в пространстве. Поскольку излучаемая мощность предполагается

одинаковой, значения можно вынести за скобки, так, что выражение (6) примет вид:

$$G = \frac{\left(\sum_{i=1}^{m_0} 1/r_i\right)^2}{\left(\sum_{j=1}^{m_1} 1/r_j\right)^2 + \sum_{k=1}^{m_2} 1/r_k^2} \quad (7)$$

Как итог, в данной модели, отношение мощностей полезного сигнала к совокупной мощности сигналов-помех зависит от взаимного относительного расположения источников, т.е. важны не абсолютные значения  $1/r_i$ , а отношения расстояний от каждого источника до точки приема.

Выражение (7) можно использовать для решение обратной задачи: по заданному значению  $G$  искать координаты, в которых должны располагаться излучатели, обеспечивающие в заданной точке (или точках, если говорить про границы областей) искомое отношение сигнал-помеха.

Далее на базе соотношения (7) осуществляется поиск границ областей, в пределах которых для каждой точки приема будет выполняться заданное отношение полезный сигнал/помеховый сигнал, т.е. где  $G > 1$ .

Установленные границы будут пропорционально масштабироваться при масштабировании координат источников и точки приема.

#### 4. Результаты моделирования

Рассматриваются четыре различных топологии взаимного расположения излучателей и точки приема.

Базовой является ситуация, когда рядом с первой группой кооперативно излучающих устройств находится группа некогерентно излучающих по отношению к ней и по отношению к друг другу устройств (третья группы). Практически это эквивалентно варианту, когда рядом с СШП беспроводной сетью, функционирует группа независимых СШП устройств.

В этом случае в (7) остаются лишь два члена: квадрат суммы в числителе и сумма квадратов в знаменателе. Отношение мощностей полезного

и помеховых сигналов пропорционально числу источников, а положение границы, на которой  $G \geq 1$ , пропорционально корню квадратному из числа устройств. Точное же положение границ при произвольном расположении узлов покажет лишь численное моделирование.

Также рассматривалась ситуация, когда в окрестности устройств первой группы находятся устройства второй и третьей групп, т.е., например, рядом с первой СШП сетью функционирует конкурирующая СШП сеть и группа независимых СШП устройств.

Наконец, анализировалась ситуации, когда в общей области радиовидимости с устройствами первой группы находятся устройства только из второй группы.

Результаты моделирования представлены на рис. 4-8, где показаны контуры областей, в пределах которых отношение мощности полезного сигнала к помеховым сигналам  $G$  не меньше заданной величины (отмечено цифрами на линиях контура). Источники полезного сигнала отмечены звездочками, источники помеховых сигналов в режиме когерентного сложения – зелеными шестиугольниками, источники помеховых сигналов в режиме некогерентного излучения – синими кружками.

*А) Один источник полезного сигнала и группа некогерентно излучающих СШП устройств (рис. 4,а,б,в).* Ситуация имитирует регулярную структуру, в которую входит один источник полезного сигнала и регулярно расположенные в его окрестности источники сигналов-помех.

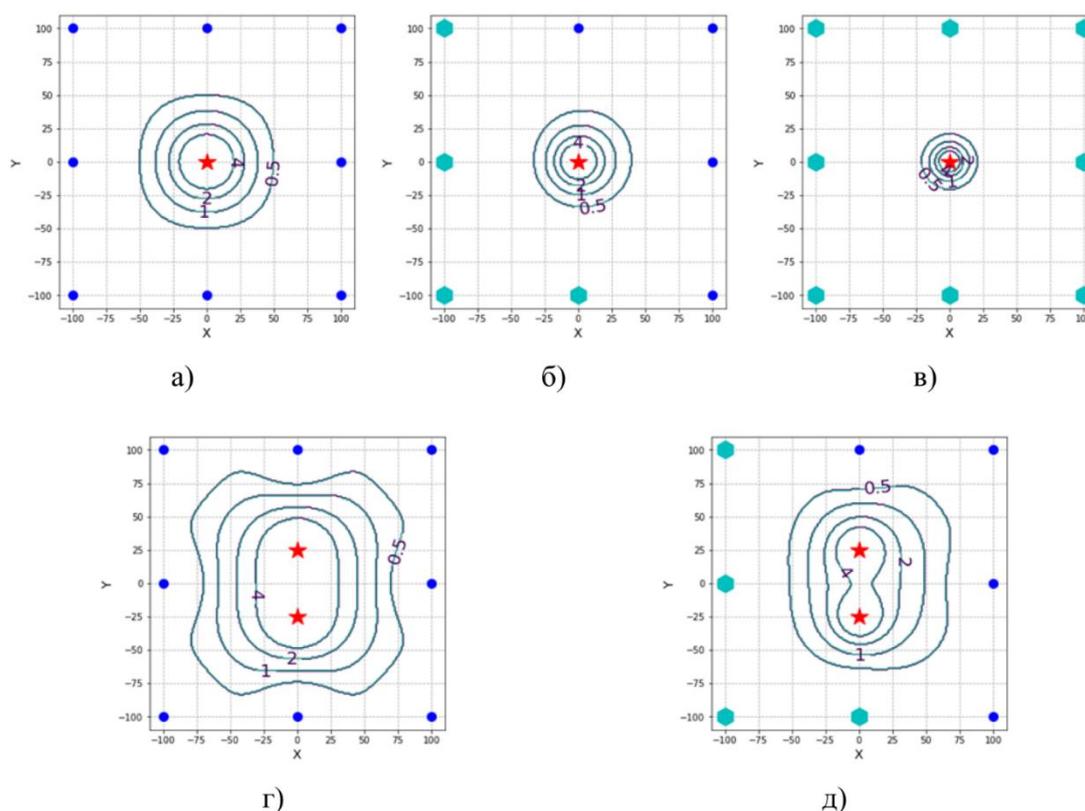


Рис. 4. Контурные области отношения  $G$  мощности полезного сигнала к помеховым сигналам для одного (а, б, в) и двух (г, д) источников полезного сигнала.

В ситуации с некогерентно излучающими устройствами (рис. 4а) область, где полезный сигнал больше помехового, имеет наибольший размер. При появлении группы когерентных излучателей (рис. 4б) и дальнейшем увеличении числа устройств, излучающих в когерентном режиме (рис. 4в), область, где мощность полезного сигнала больше помехового, уменьшается. Это также непосредственно вытекает из формулы (6). Для топологий на рис. 4а и 4в, можно заметить, что для одной и той же точки приема, в знаменателе сумма квадратов (слагаемое от некогерентных источников, подгруппа  $M_2$ ) заменяется на квадрат суммы (слагаемое от когерентных источников, подгруппа  $M_1$ ), и для восьми источников помех сложение по мощности переходит к сложению по амплитуде, что приводит к уменьшению размера области. В конкретной ситуации на рис. 4а контур области  $G = 4$  приблизительно переходит в контур области  $G = 0.5$  на рис. 4в, что как раз соответствует тому, что для восьми источников значение  $G$  отличается в 8 раз.

Характерный линейный размер области уменьшается в корень из числа когерентно излучающих источников.

В ситуации (рис. 4б) с комбинированным числом излучателей, где когерентные излучатели расположены по одну сторону от источника полезного сигнала, область  $G > 1$  становится несимметричной: расширяется в сторону, противоположную от группы источников когерентно излучающих сигналов.

**Б) Два источника полезного сигнала (рис. 4,з,д).** Для того, чтобы рассмотреть возможности по расширению области, где полезный сигнал превышает помеховый при прочих равных условиях, рассмотрим топологию, в которой имеются два источника полезного сигнала, которые расположены на расстоянии вдвое меньшем, чем шаг регулярной сетки, в узлах которой находятся излучатели помеховых сигналов (рис. 4).

Расчеты отношения сигнал/помеха  $G$  для данной топологии показывают ожидаемое увеличение области, где полезный сигнал от двух когерентно работающих источников по мощности превышает помеховый. При появлении подгруппы когерентных источников помех, область в их окрестности сужается, как и в первом сценарии с одним источником полезного сигнала.

Вместе с тем, вычисление отношения сигнал/помеха в месте расположения одного из источников даст результат, аналогичный ситуации с одним источником, и мы в этом случае фактически возвращаемся к ситуации на рис. 4,а, когда мощность помеховых сигналов превышает мощность полезного сигнала. Поэтому интересен вопрос поиска топологий расположения устройств, которые позволяют сохранять в пределах группы единую область, где выдерживается заданное отношение полезный сигнал/помеховый сигнал. С этой целью рассмотрим следующие варианты.

**В) Три источника полезного сигнала (рис. 5).** Рассмотрим расположение приемопередатчиков в вершинах правильного треугольника.

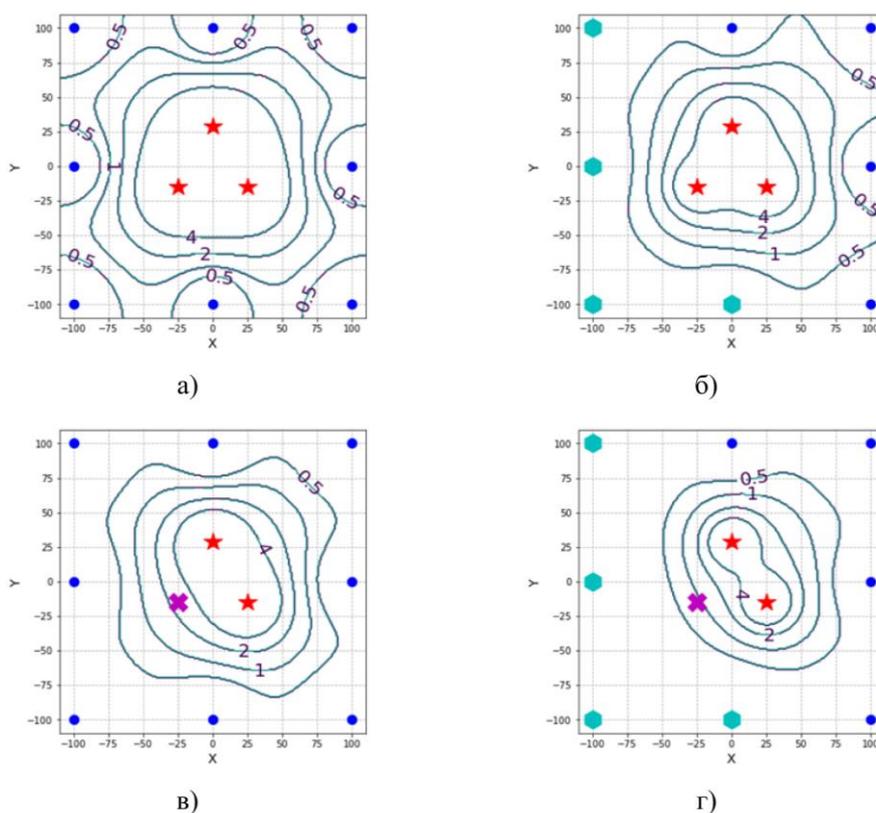


Рис. 5. Контурные области отношения  $G$  мощности полезного сигнала к помеховым сигналам для трех (а, б) и двух (в, г) источников полезного сигнала.

В такой конфигурации три устройства могут образовать в своей окрестности область, внутри которой действует отношение сигнал/помеха не хуже заданной, как в условиях некогерентных, так и когерентных помех.

В случае, если одно из устройств "выключается", ситуация меняется в худшую сторону. Происходит сужение области, где отношение сигнал-помехи больше четверки и "выключенное" устройство переходит в область, где  $2 < G < 4$  (Рис. 5) в условиях некогерентных помех, и где  $G < 2$ , если появляются когерентные помехи.

Фактически единственным способом увеличения отношения сигнал-помеха является дальнейшее наращивание числа устройств, работающих в кооперативном режиме и это также иллюстрируется результатами на рис. 6, где изображена группа из четырех устройств.

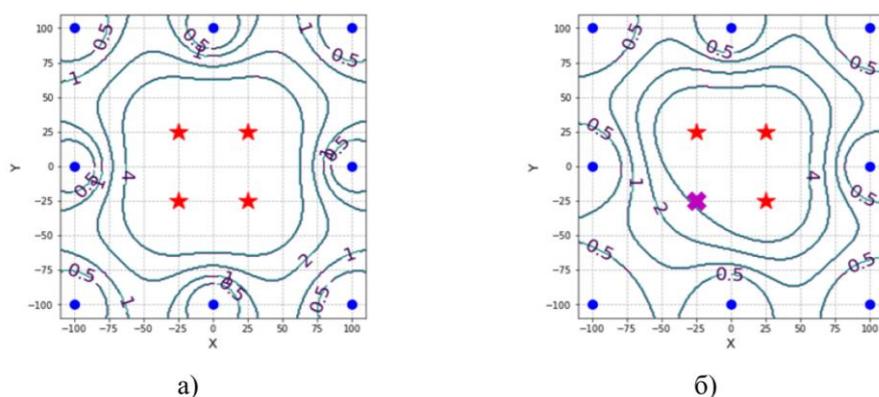


Рис. 6. Контуры областей отношения  $G$  мощности полезного сигнала к помеховым сигнала для четырёх (а) и трёх (б) источников полезного сигнала.

В этой ситуации получаем улучшение в отношении сигнал-помеха в месте расположения одного из устройств (крест), как минимум для ситуации с некогерентными помехами (рис. 6,б).

Ситуация с наличием когерентных помех не позволяет сохранить интересующий уровень отношения сигнал-помеха (рис. 7,б,в), поэтому это диктует необходимость дальнейшего увеличения количества устройств в группе  $M_0$  (рис. 7,г). Например, добавление устройства, расположенного в центре группы, корректирует границу области так, что и при наличии источников когерентных помех, сохраняется сплошная область, где  $G > 4$ .

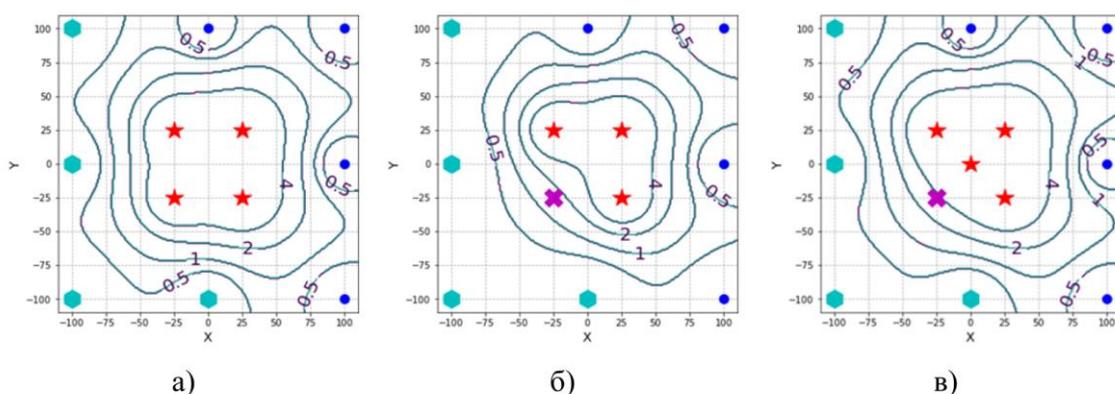


Рис. 7. Контуры областей отношения  $G$  мощности полезного сигнала к помеховым сигнала для четырёх (а, в) и трёх (б) источников полезного сигнала.

**Г) Влияние удаленных источников некогерентных помех на отношение сигнал-помехи.** В ситуации, когда появляются устройства – источники

сигналов-помех, расположенных на втором и последующих рядах, контуры областей, в пределах которых сохраняется заданное отношение сигнал-помеха, изменяются. Результаты расчётов этих изменений показаны в сравнении на рис. 8, где изображены две ситуации: с одним и с двумя рядами помеховых устройств, которые отдалены на вдвое большее расстояние от области расположения устройств группы  $M_0$ , чем устройства первого ряда.

Оценки и результаты расчетов показывают, что их влияние меняет картину контуров сплошной области, но конкретная степень этого влияния зависит от количества кооперативно работающих устройств в группе: чем больше устройств в группе и чем ближе они расположены, тем более незначительно влияние помеховых устройств соседней группы. Благодаря квадратичному характеру затухания мощности сигнала от расстояния степень влияния удаленных устройств существенно меньше, чем ближайших.

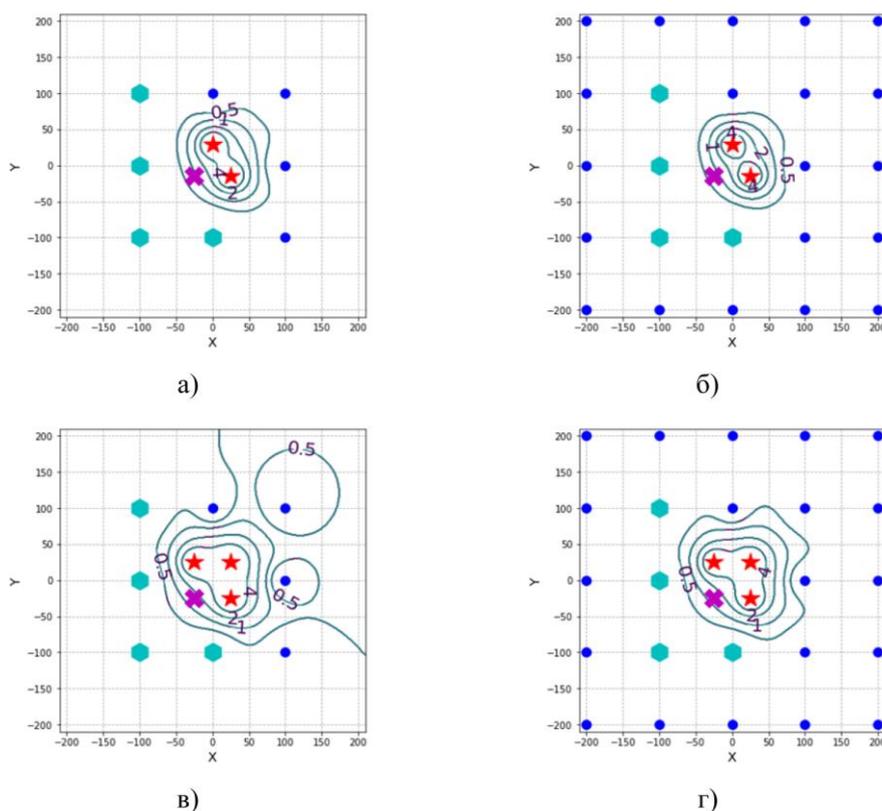


Рис. 8. Контурные области отношения  $G$  мощности полезного сигнала к помеховым сигналам для трех источников полезного сигнала для восьми помеховых устройств (а) и (б) для 24 устройств.

## Заключение

В работе предложена и проанализирована численная модель пространственного распределения отношения полезный сигнал/помеха в сети из кооперативно взаимодействующих СШП устройств, находящихся в общей области радиовидимости. Рассмотрены различные пространственные конфигурации взаимного расположения излучателей помехового и полезного сигнала.

Установлены условия, показывающие возможность образования сплошной области радиовидимости для излучателей полезного сигнала, в пределах которой отношение полезного сигнала к помеховому сигналу не опускается ниже заданного значения. Ресурсом, который позволяет расширить эти области, является реализация когерентного сложения СШП хаотических радиоимпульсов от приемопередатчиков, работающих в кооперативном режиме.

Данная модель является основой для расчета вероятности ошибок при беспроводной передаче информации при помощи СШП хаотических радиоимпульсов между группами конкурирующих устройств без разделения по времени.

**Финансирование:** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант №. 23-29-00297

## Литература

1. Wang M. et al. An overview of enhanced massive MIMO with array signal processing techniques // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. – 2019. – Т. 13. – №. 5. – С. 886-901.
2. Wang Z. et al. Extremely Large-Scale MIMO: Fundamentals, Challenges, Solutions, and Future Directions // IEEE Wireless Commun. – 2024. – V. 31. – № 3. – P. 117-124.

3. Huo Y. et al. Technology trends for massive MIMO towards 6G // Sensors. – 2023. – Т. 23. – №. 13. – С. 6062.
4. Elbir A.M. et al. Near-Field Terahertz Communications: Model-Based and Model-Free Channel Estimation // IEEE Access. – 2023. – V. 11. – P. 36409–36420.
5. Liu Y. et al. Near-Field Communications: A Tutorial Review // IEEE Open J. Commun. Soc. 2023. Vol. 4. P. 1999–2049.
6. Zhang Y. et al. Mixed Near- and Far-Field Communications for Extremely Large-Scale Array: An Interference Perspective // IEEE Commun. Lett. 2023. Vol. 27, № 9. P. 2496–2500, <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2023.3296409> .
7. Ning B. et al. Beamforming technologies for ultra-massive MIMO in terahertz communications // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2023. – Т. 4. – С. 614-658.
8. Kuzmin L. V., Efremova E. V., Itskov V. V. Modulation, Shaping and Replicability of UWB Chaotic Radiopulses for Wireless Sensor Applications // Sensors. – 2023. V. 23. – №. 15. – P. 6864.
9. IEEE Std 802.15.4z-2020 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2020); IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks—Amendment 1: Enhanced Ultra Wideband (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques. IEEE Press: New York, NY, USA, 2020; pp. 1–174.
10. Miller, L.E. Why UWB? A Review of Ultrawideband Technology // Technical report. Wireless Communication Technologies Group. National Institute of Standards and Technology Gaithersburg. Maryland, USA. 2003.
11. Sergienko S. UWB Technology Review: Modules, Characteristics, Usage, Perspectives // 15 Feb 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://sirinsoftware.com/blog/uwb-technology-review-modules-characteristics-usage-perspectives> (дата обращения: 15.07.2024)
12. Dmitriev A., Ryzhov A., Sierra-Teran C. Statistical Characteristics of Differential Communication Scheme Based on Chaotic Radio Pulses // Electronics. – 2023. – V. 12. – №. 6. – P. 1495.

13. Kuzmin L. V., Efremova E. V. Filtering and Detection of Ultra-Wideband Chaotic Radio Pulses with a Matched Frequency-Selective Circuit // Electronics. – 2023. – V. 12. – №. 6. – P 1324.
14. Zhou Q. F., Lau F. C. M. Analytical performance of M-ary time-hopping orthogonal PPM UWB systems under multiple access interference // IEEE transactions on communications. – 2008. – Т. 56. – №. 11. – С. 1780-1784.
15. Song Y. et al. A real time UWB MIMO system with programmable transmit waveforms: Architecture, algorithms and demonstrations // IEEE transactions on antennas and propagation. – 2012. – Т. 60. – №. 8. – С. 3933-3940.
16. Yin Z. et al. A joint multiuser detection scheme for UWB sensor networks using waveform division multiple access // IEEE Access. – 2017. – Т. 5. – С. 11717-11726.
17. Кузьмин Л. В. и др. Эксперименты по когерентному сложению хаотических радиоимпульсов в беспроводном канале // Радиотехника и электроника. – 2023. – Т. 68. – №. 12. – С. 1178-1183.
18. Кузьмин Л. В. и др. Макетирование когерентной генерации и сложения сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов в беспроводном канале // Материалы X Всероссийской научно-технической конференции, «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем» («СВЧ-2024»), 16-17 апреля 2024 г., г. Омск, Стр. 99-109.
19. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Кузьмин Л.В. Генерация последовательности хаотических импульсов при воздействии периодического сигнала на динамическую систему // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31. – №22. – С. 29-35.
20. Дмитриев А.С. и др. Генерация потока хаотических импульсов в динамической системе с внешним (периодическим) воздействием // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. – 51. – № 5. – С. 593-604.
21. Dmitriev A. et al. Forming pulses in nonautonomous chaotic oscillator // Int. J. of Bifurcation and Chaos. 2007. Т. 17. №. 10. С. 3443-3448.

22. Andreyev Y. V. Energy Radiation Pattern of Ultra-Wideband Chaotic Ensemble // 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP). – IEEE, 2019. – Т. 1. – С. 364-367.
23. Зубков А.С., Кузьмин Л.В. Модель пространственно-временного когерентного сложения сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов, генерируемых независимыми излучателями // Труды X Международная конференция. «Инжиниринг и телекоммуникации En&T - 2023». 22–23 ноября, 2023. Сборник тезисов. [Электронный ресурс]. URL: <http://books.mipt.ru>. Загл. с титул. экрана. ISBN 978-5-7417-0841-5 (сетевое) (дата обращения: 28.02.2024)
24. Зубков А.С., Кузьмин Л.В., Ефремова Е.В. Модель пространственно-временного когерентного сложения сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов, формируемых независимыми излучателями // Радиотехника и электроника. – 2024. – Т. 69. – №. 4. (в печати).

**Для цитирования:**

Зубков А.С., Кузьмин Л.В., Ефремова Е.В. Модель пространственного распределения отношения полезный сигнал/помеха в сети сверхширокополосных приемопередатчиков. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.22>  
000000000000