

СШП прямохаотическая передающая панель. Теория и эксперимент

Ю.В. Андреев¹, А.С. Дмитриев², В.А. Лазарев²

¹Московский физико-технический институт (государственный университет)
141700, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., 9, chaos@mail.mipt.ru

²Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН 125009, г. Москва, ул. Моховая, д. 11, стр. 7, chaos@cplire.ru

В докладе теоретически и экспериментально исследуется СШП прямохаотическая передающая панель – новый тип СШП передающих устройств, реализующий сложение мощностей отдельных передатчиков в пространстве. Использование СШП прямохаотической панели позволяет существенно увеличить дальность системы прямохаотической связи.

In this report, a novel type of UWB transmitter devices, i.e., an UWB direct chaotic transmitter panel is investigated theoretically and experimentally. With this device the powers of individual panel transmitters are summed in space. UWB direct chaotic transmitter panels substantially increase the distance range of direct chaotic communications.

Сверхширокополосная прямохаотическая передающая панель

В последнее десятилетие для связи персонального уровня было предложено использовать сверхширокополосные (СШП) сигналы [1]. Национальными регуляторами были определены диапазоны частот и установлены ограничения на спектральную мощность излучения СШП сигналов для нелегального использования [1, 2]. Одной из эффективных технологий СШП связи является прямохаотическая связь, в которой передаваемая информация кодируется потоком хаотических радиоимпульсов, формируемых непосредственно в полосе частот канала, выделенного для передачи информации, так что прием и демодуляция информации осуществляется в той полосе частот канала связи, без промежуточных преобразований вверх/вниз [3, 4].

В силу ограничений на спектральную плотность излучения дальность СШП устройств связи составляет 10–30 м, поэтому основные области применения СШП связи – это беспроводные сети связи и беспроводные сенсорные сети малого радиуса действия (локальные и персональные сети). Для того чтобы расширить область применения технологии СШП прямохаотической связи, необходимо увеличить дальность действия приемопередающих устройств в режиме «точка-точка». В данном докладе для достижения этой цели предлагается увеличить мощность передачи путем сложения мощностей нескольких передатчиков в пространстве.

Следует заметить, что метод сложения мощностей в пространстве для узкополосных систем связи известен и применяется, например, в фазированных антенных решетках [5]. В таких системах сигнал передатчика излучается через несколько антенн, однако в силу когерентного сложения волн в пространстве мощность сигнала на входе приемника зависит от соотношения фаз отдельных волн, поэтому диаграмма излучения антенной решетки получается узконаправленной.

Для реализации подхода со сложением мощностей передатчиков в пространстве предлагается СШП прямохаотическая передающая (излучающая) панель, представляющая собой решетку СШП передатчиков, работающих по прямохаотической схеме и связанных между собой на уровне информационного сигнала.

В основе принципа действия передающей панели лежит свойство некоррелированности хаотических сигналов, благодаря которому сложение этих сигналов происходит по мощности. В самом деле, пусть $x_i(t)$, $i = 1, \dots, N$ – некоррелированные хаотические сигналы с нулевым средним, тогда энергия суммарного сигнала E равна интегралу от

суммы мощностей отдельных сигналов

$$E = \int \left(\sum_{i=1}^N x_i(t) \right)^2 dt = \int \left(\sum_{i=1}^N x_i^2(t) + \sum_{i \neq j}^N x_i x_j \right) dt \approx \sum_{i=1}^N \left(\int x_i^2(t) dt \right), \quad (1)$$

так как кросскорреляционные члены также являются хаотическими с нулевым средним и при интегрировании обнуляются [6].

Генераторы хаоса в передатчиках СШП передающей панели являются независимыми, поэтому в каждом передатчике генерируются уникальные хаотические несущие колебания. На модуляторы всех передатчиков подается один и тот же информационный сигнал, поэтому они синхронно излучают, каждый через свою всенаправленную антенну, одну и ту же последовательность хаотических радиоимпульсов. В пространстве сигналы складываются некогерентным образом, благодаря чему мощность сигнала на входе приемника равна сумме мощностей сигналов, дошедших от каждого из передатчиков панели.

Модель СШП прямохаотической передающей панели

Проверим эти рассуждения на численной модели СШП прямохаотической передающей панели.

Пусть прямохаотическая панель состоит из N источников хаотических сигналов, размещенных в ограниченной области пространства. Без ограничения общности можно считать, что все источники имеют единичную мощность $P_i = 1$, $i = 1, \dots, N$. Хаотический сигнал сосредоточен в СШП полосе частот $f \in [f_1, f_2]$. Примем также, что начало координат совпадает с геометрическим центром панели.

Для простоты считаем, что каждый передатчик панели оснащен всенаправленной антенной. Все расчеты делаются в азимутальной плоскости ($\theta = 0$), поэтому результаты относятся также к передатчикам с дипольными антеннами, имеющими в азимутальной плоскости всенаправленную (круговую диаграмму) направленности.

Так как рассматриваемые сигналы являются сверхширокополосными, их описание и соответственно численное исследование панели удобнее проводить не в частотной, а во временной области. Рассчитаем независимые от частоты интегральные характеристики излучения панели, такие, как диаграмма излучения $P_{rx}(R, \varphi)$ и усиление $G(R, \varphi)$.

Под диаграммой излучения панели $P_{rx}(R, \varphi)$ будем понимать мощность суммарного сигнала в точке с полярными координатами (R, φ) . Пусть $x_i(t)$, $i = 1, \dots, N$ – хаотические несущие сигналы передатчиков панели на выходе антенн, N – число передатчиков панели. Для расчета мощности суммарного сигнала $P_{rx}(R, \varphi)$ вычислим расстояние d_i от i -го передатчика панели до приемника и время распространения сигнала $t_i = d_i/c$, где c – скорость света. Зная расстояние d_i от источника до приемника, определим ослабление сигнала. С учетом ослабления и относительных задержек сигналов отдельных передатчиков получаем:

$$P_{rx}(R, \varphi) = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_{i=1}^N \frac{x_i(t + t_i)}{d_i} \right)^2 dt, \quad (2)$$

где T – временной интервал усреднения мощности суммарного сигнала.

Усиление панели $G(R, \varphi)$ рассчитываем как отношение мощности суммарного сигнала в точке приема к мощности сигнала от хаотического источника единичной мощности P_0 , размещенного в начале координат, т.е.

$$G(R, \varphi) = P_{rx}(R, \varphi) / P_{rx0}(R, \varphi), \quad (3)$$

где $P_{rx0}(R, \varphi)$ – мощность сигнала, пришедшего в точку (R, φ) от единственного источника в начале координат.

Нетрудно видеть, что в рассматриваемом случае $P_{rx0}(R, \varphi) = 1/R^2$.

Расчеты проведем для следующих значений параметров модели. Полосачастот хаотических сигналов $F = 3\text{--}5$ ГГц, длительность интервала усреднения мощности $T = 1$ мкс. Передающая панель имеет линейное расположение источников с шагом d ; шаг принимает значения $d = \lambda/2, \lambda$ и 2λ от средней частоты диапазона $f_c = 4$ ГГц ($\lambda = 7,5$ см). Длина панели при этом получается $L = (N-1)d \approx 7.5\lambda, 15\lambda, 30\lambda$. Расстояние от центра панели $R = 130\lambda$.

На рис. 1. приведены расчеты диаграммы излучения и мощности для $N = 1, 2, 4, 8, 16$ передатчиков. Как видно из рис. 1., несмотря на линейное расположение передатчиков, во всех случаях диаграмма излучения панели является круговой. При этом колебания мощности P_{rx} и коэффициента усиления G по азимуту не превышают 0,2 дБ.

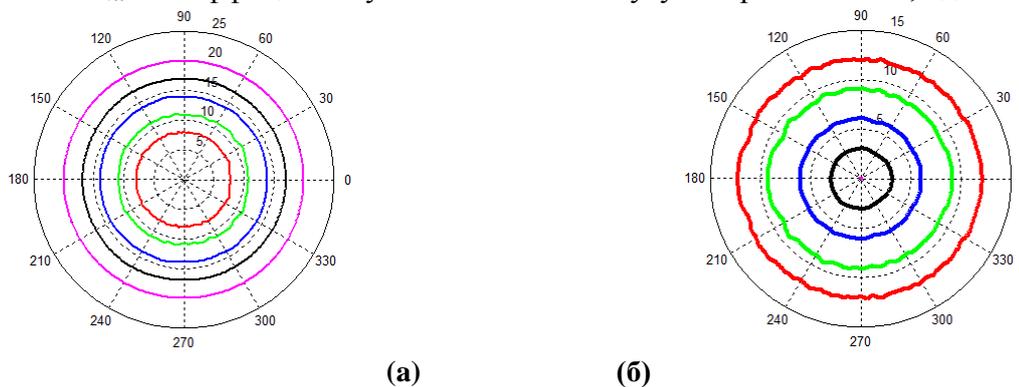


Рис. 1. (а) Мощность суммарного сигнала $P_{rx}(R, \varphi)$ и (б) усиление $G(R, \varphi)$ [дБ] панели с 1, 2, 4, 8, 16 излучателями (на графике $P_{rx}(R, \varphi)$ приведены отрицательные значения в дБ, $d = \lambda$)

Из графика усиления панели $G(R, \varphi)$ на рис. 1б видно, при каждом удвоении числа излучателей N усиление передающей панели G увеличивается на 3 дБ (в 2 раза), что подтверждает теоретические оценки. Таким образом, убеждаемся, что $G(R, \varphi) = N$.

Результаты расчетов вариантов расположения передатчиков панели в узлах квадратной или гексагональной решетки, а также панели со случайным расположением передатчиков показали, что излучающие свойства прямохаотической панели не зависят от характера расположения отдельных передатчиков на панели и расстояния между ними.

Эксперимент

Физический эксперимент проводился с использованием мелкосерийных СШП прямохаотических приемопередатчиков ППС-43 [7, 8] (см. рис. 2.). Эти устройства предназначены для создания сверхширокополосных беспроводных сенсорных сетей и сетей связи. Передача информации осуществляется в них при помощи хаотических радиоимпульсов диапазона $F = 3\text{--}5$ ГГц на расстояниях до $L = 30$ м (в основном, это связь внутри помещений); физическая скорость передачи до $R = 6$ Мбит/с.

Для эксперимента создана сеть, показанная на рис. 3. Приемопередатчики с номерами 1, 2, ..., N , играющие роль передатчиков СШП панели, расположены в линейку рядом друг с другом. Приемопередатчик под номером 0 располагается и используется в качестве «задающего». Приемник R_x находится на расстоянии L от панели.

Идея эксперимента заключается в том, что по команде «задающего» передатчика приемопередатчики панели одновременно отправляют одинаковые пакеты СШП хаотических радиоимпульсов, а на входе приемника эти радиоимпульсы складываются по

мощности. Таким образом, в данной схеме синхронизация передатчиков панели по информационному сигналу осуществляется беспроводным способом, что позволяет использовать готовые приемопередатчики без переделки.



Рис. 2. Экспериментальная панель с 8 передатчиками (слева – задающий передатчик)

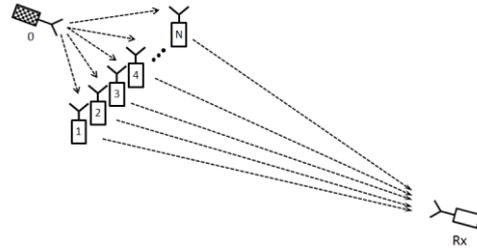


Рис. 3. Схема эксперимента со сверхширокополосной прямохаотической излучающей панелью

Так как управляющие микроконтроллеры(МК) передатчиков панели тактируются независимо, передатчики излучают хаотические радиоимпульсы не строгоодновременно, а с точностью до 1-2 тактов МК. Чтобы этот фактор не влиял на измерения, а также для большей наглядности длительность СШП хаотических радиоимпульсов установлена $T_p \approx 670$ нс. Поэтому, даже несмотря на неодновременность посылок пакетов, на большей своей части импульсы перекрываются по времени и могут эффективно складываться.

Приемник хаотических радиоимпульсов построен на логарифмическом детекторе (см. подробнее [9]). Напряжение на выходе аналоговой части приемника V_{LD} пропорционально логарифму мощности входного сигнала $P_{вх}$, т.е. $V_{LD} = S \cdot \log(P_{вх})$, где S – крутизна детектора; здесь $S = 22$ мВ/дБ [10]. Сигнал V_{LD} оцифровывается с помощью цифрового осциллографа и затем обрабатывается на ПК в программе Матлаб.

В ходе эксперимента число передатчиков панели последовательно изменялось в 2 раза и оценивалось изменение мощности принимаемого сигнала $P_{вх}$ по относительному изменению напряжения V_{LD} . Было проведено несколько серий экспериментов, в разных помещениях, характеризующихся различной обстановкой распространения сигналов.

На рис. 4 и 5 приведены результаты одного из экспериментов. Включались 1, 2, 4, 8 передатчиков в следующем порядке: 1 – 1 2 – 1 2 3 4 – 1 2 3 4 5 6 7 8 – 5 6 7 8 – 7 8 – 8. На рис. 4 показаны огибающие хаотических радиоимпульсов на выходе логарифмического детектора для панели с 1, 2 и 4 передатчиками. Путем измерения средней амплитуды импульсов напряжения V_{LD} оценивалось изменение мощности принятого сигнала. В данном случае видно, что при увеличении числа передатчиков с 1 до 2 средняя мощность возросла на 4,3 дБ, а при увеличении с 1 до 4 передатчиков мощность возросла на 5,8 дБ.

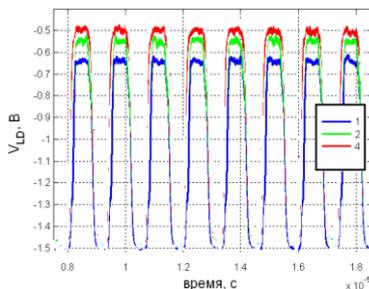


Рис. 4. Амплитуда сигналов на выходе приемника для панели с 1, 2 и 4 передатчиками

Данные усиления панели G , полученные в этом эксперименте, приведены на рис. 5.

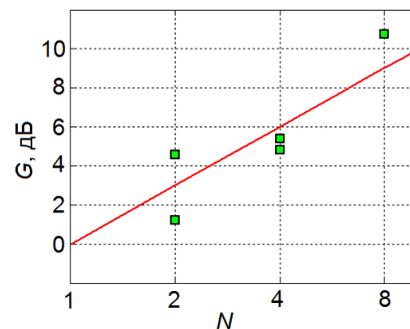


Рис. 5. Экспериментальная зависимость усиления панели G от числа передатчиков N

На графике в целом прослеживается линейная зависимость мощности излучения панели от числа передатчиков N (показана линией), однако можно видеть, что отклонения от линейной зависимости достигают ± 2 дБ. Кроме того, наблюдается разброс в значениях усиления панели при включении различных групп передатчиков одной панели, например, пар передатчиков 1-2 и 7-8 в описываемом случае.

Данная зависимость $G(N)$ получена в лабораторной комнате; похожая картина наблюдалась и в других типах помещений (конференц-зал, коридор).

Чтобы объяснить отклонение зависимости $G(N)$ от линейной в пределах ± 2 дБ, следует принять во внимание такие факторы, как разброс передатчиков по мощности излучения, точность оценки изменений мощности принятого сигнала, многолучевой характер распространения СШП сигналов в помещениях.

Разброс по мощности передатчиков серии ППС не превышает 1-2 дБ. Точность измерения средней амплитуды импульсов напряжения V_{LD} на выходе аналоговой части приемника составляет около 1 дБ. Как следует из экспериментальных исследований [9], при многолучевом распространении СШП хаотических радиоимпульсов в помещениях величина интерференционных флуктуаций сигнала не превышает 1–1,5 дБ. По-видимому, наблюдаемое отклонение зависимости $G(N)$ от линейной может быть объяснено влиянием совокупности данных факторов.

Заключение

Численно и в физическом эксперименте исследована СШП прямохаотическая передающая панель – новый тип СШП передающих устройств, реализующий сложение мощности отдельных передатчиков в пространстве. Дальность действия СШП прямохаотической панели из N передатчиков в \sqrt{N} раз больше, чем дальность одного передатчика. При использовании всенаправленных антенн диаграмма излучения панели также является всенаправленной.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ПФИОФН РАН «Современные проблемы радиофизики» и ФЦП ИР 2014-2020 Минобрнауки России, Субсидия №.14.604.21.0036 (идентификатор RFMEFI60414X0036).

Литература

1. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Кузьмин Л.В., Мохсени Т.И. Сверхширокополосные сигналы для беспроводной связи // Радиотехника, 2008, №8, с. 83–90.
2. Решение ГКРЧ № 09-05-02 от 15 декабря 2009 г.
3. Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Максимов Н.А. и др. Перспективы создания прямохаотических систем связи в радио и СВЧ диапазонах // Радиотехника, 2000, № 3, с. 9–20.
4. Дмитриев А.С., Захарченко К.В., Пузиков Д.Ю. Введение в теорию прямохаотической передачи информации // Радиотехника и электроника, 2003, т. 48, №3, с. 328–338.
5. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1988 г., 432 с.
6. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Часть 1. Случайные процессы. – М.: Наука, 1966 г.
7. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., и др. Сверхширокополосная беспроводная связь и сенсорные сети // Радиотехника и электроника, 2008, т. 53, №10, с. 1278-1289.
8. Сайт ООО «НаноХаос»: <http://www.nanohaos.ru>.
9. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Лазарев В.А., Рыжов А.И. Экспериментальное исследование распространения сверхширокополосных хаотических сигналов в помещениях // Успехи современной радиоэлектроники, 2013, №3, с. 55-66.
10. Спецификация ИС AD8317ACPZ // www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8317.pdf.