

## Фрактальная система связи

© В.Н. Болотов, Ю.В. Ткач

Институт электромагнитных исследований,  
61022 Харьков, Украина  
e-mail: bolotov@vl.kharkov.ua

(Поступило в Редакцию 7 августа 2007 г.)

Сложная электромагнитная обстановка и необходимость защиты информации от несанкционированного доступа требуют развития новых технологических решений при создании систем связи. Одним из таких подходов является переход к фрактальным системам связи (ФСС), использующим в качестве носителей информации помехозащищенные сигналы с фрактальными спектрами. Рассмотрены основы ФСС и приведены результаты ее практической реализации для связи компьютера по эфиру и коаксиальному кабелю.

PACS: 41.20.Jb, 84.40.-x

### Введение

В настоящее время широкое распространение получили широкополосные системы связи. В этих системах используются новые носители информации — сверхширокополосные (СШП) сигналы. Использование таких сигналов обеспечивает высокие скорости передачи информации (до 100 Mb/s) и позволяет создавать системы СШП-связи, имеющие высокую помехозащищенность и предохраняющие передаваемую информацию от несанкционированного доступа. Часто в качестве носителя информации выбирают импульсные сигналы с широким спектром, обусловленным малой длительностью сигнала (менее 1 ns). Основным недостатком таких сигналов является то, что их спектр определяется в основном длительностью импульсов и не может эффективно регулироваться.

Одним из альтернативных направлений, интенсивно развиваемых в настоящее время, является разработка помехозащищенной системы связи, использующей фрактальные сигналы различных видов [1]. Данная фрактальная система связи (ФСС) в эфирной и кабельной модификации была впервые реализована экспериментально в Харькове в Институте электромагнитных исследований (ИЭМИ).

### Фрактальные сигналы

С появлением современных электронных технологий появилась возможность формировать и передавать по кабелям или в эфире сигналы малой длительности, имеющие сложную амплитудно-временную зависимость. Таким образом, появилась возможность создавать СШП-сигналы разных типов, в том числе и сигналы с фрактальными спектрами — фрактальные сверхширокополосные (ФСШП) сигналы.

Фрактальными являются такие сигналы, спектры которых, или их временные реализации, имеют самоподобную структуру, задаваемую множеством Кантора. В настоящей работе для создания фрактальной систе-

мы связи нами использовался фрактальный вейвлет. Этот сигнал является одним из видов фрактальных сигналов.

Фрактальный вейвлет (ФВ) представляет собой импульс сложной формы, спектр которого является предканторовским множеством [2]. Спектр ФВ является самоподобным, т.е. разные участки спектра имеют одинаковый вид. Временная реализация ФВ описывается выражением

$$s(t) = \prod_{n=0}^N \cos((1 - \xi)\xi^n 2\pi f_0 t), \quad (1)$$

где  $0 < \xi \leq 1/2$  и  $N \rightarrow \infty$ . Выбор  $N$  и  $f_0$  связан с возможностями электронного оборудования и определяется доступными скоростями оцифровки.

Спектр данной реализации (1) имеет самоподобную структуру множества Кантора и определяется параметрами  $\xi$  и  $f_0$ . Частоты спектра данного фрактального сигнала принадлежат точкам множества Кантора и сосредоточены на отрезке  $[-f_0, f_0]$ . Это следует из того факта, что фурье-образ данного сигнала есть обобщенная функция Кантора, носитель которой, как было показано в [2], есть множество Кантора, построенное в данном случае на отрезке  $[-f_0, f_0]$ . Таким образом, вводится параметр (максимальная частота фрактального спектра)  $f_u = f_0$ , определяющая ширину спектра. Минимальную частоту спектра фрактального сигнала нетрудно вычислить исходя из того, что она является соответствующей правой точкой первого рода множества Кантора, т.е.  $f_l = f_0(1 - 2\xi)$  [2]. Спектр временной реализации, описываемой выражением (1), имеет самоподобную структуру множества Кантора, так как частоты спектра обладают полугрупповой симметрией. Таким образом, существует иерархия вложенных друг в друга спектров, имеющих одинаковый аналитический вид. Такие сигналы впервые были получены и исследованы экспериментально [1].

Хорошо известно, что для разграничения сигналов по занимаемой ими полосе частот используется коэффици-

ент широкополосности  $\eta$ :

$$\eta = \frac{f_u - f_l}{f_u + f_l}, \quad (2)$$

где  $f_u$ ,  $f_l$  — верхняя и нижняя частоты в спектре видеосигнала, т.е. сигнала без несущей. В соответствии с принятым определением сигналы, имеющие  $\eta \leq 0.01$ , относятся к узкополосным,  $0.01 \leq \eta \leq 0.25$  — к широкополосным, а  $0.25 \leq \eta \leq 1$  — к сверхширокополосным. В случае фрактального вейвлета  $f_u = f_0$ , а  $f_l = f_0(1 - 2\xi)$ . Следовательно, для фрактального вейвлета коэффициент  $\eta$  не зависит от положения верхней и нижней границ спектра. Его величина определяется выражением:

$$\eta = \frac{\xi}{1 - \xi}. \quad (3)$$

Таким образом, параметр  $\xi$ , входящий в аналитическое выражение для фрактального вейвлета (1), определяет степень его широкополосности. Напомним, что  $0 < \xi \leq 1/2$ . Например, для  $\xi = 1/3$  коэффициент широкополосности равен  $\eta = 0.5$ . При соответствующем выборе параметра  $\xi$  сигналы с фрактальными спектрами относятся к СШП-сигналам и являются ФСШП-сигналами.

Спектры традиционных СШП-сигналов обычно не имеют точной верхней и нижней границ. Принято определять их на уровне 10 dB от значения максимальной амплитуды в спектре. Основным свойством фрактальных сигналов, отличающих их от обычных СШП-сигналов, является тот факт, что они обладают точными верхней и нижней границами спектра. Для таких сигналов нет необходимости устанавливать уровень, на котором фиксируется нижняя и верхняя границы спектра.

На рис. 1 приведен типичный спектр фрактального видеосигнала, рассчитанный теоретически. Сигналы такого типа используются в качестве моделирующих сигналов в передатчике разработанной нами ФСС.

В ИЭМИ на стенде, предназначенном для исследования работоспособности ФСС в условиях внешних помех, были экспериментально получены сигналы с фрактальными спектрами на различных несущих частотах от 2 до 8 GHz. На рис. 2 представлен экспериментально полученный спектр фрактального вейвлета

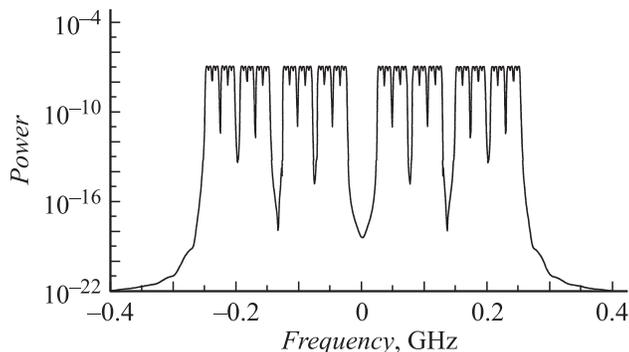


Рис. 1. Теоретический спектр фрактального вейвлета.

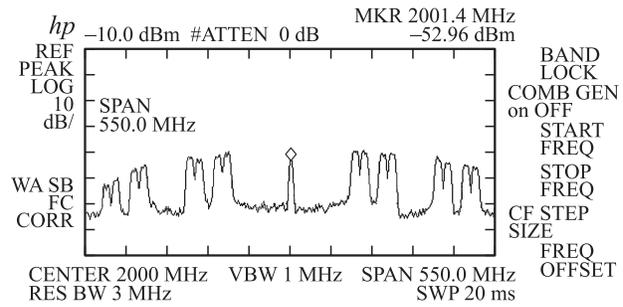


Рис. 2. Экспериментальный спектр фрактального вейвлета на несущей 2 GHz.

длительностью 200 ns с несущей 2 GHz. Ширина спектра равна 500 MHz. Измерение спектров фрактальных сигналов производилось на спектральном анализаторе HP 8592A. Передача сигналов от передатчика к приемнику осуществлялась как в эфире, так и по коаксиальному кабелю. По коаксиальному кабелю исследовалось как прохождение видеоФВ (ВФВ), так и ФВ с несущей.

В экспериментах использовался высокочастотный коаксиальный кабель В3199 длиной 50 м. После прохождения по кабелю ВФВ его форма и спектр не изменялись. Происходило лишь небольшое затухание ВФВ в кабеле на уровне 2 dB на длине 50 м. Для проведения экспериментов по прохождению ФВ с синусоидальной несущей частотой 2 GHz через 50-метровый коаксиальный кабель В3199 были использованы широкополосные передатчик и приемник фрактальных сигналов, работающие в полосе частот от 1700 MHz до 2400 MHz. Эксперименты проводились в режимах амплитудной и фазовой модуляции сигналов. В режиме как амплитудной так и фазовой модуляции форма и спектр ФВ с синусоидальной несущей, после прохождения кабеля В3199 длиной 50 м, претерпели незначительные изменения. Ослабление ФВ на длине 50 м составило в этом случае величину: для фазовой модуляции ФВ — 7.5–8 dB, для амплитудной модуляции 6 dB. Таким образом, проведенные эксперименты показали, что ФВ с несущей и без нее может быть использован для осуществления кабельной связи на значительные расстояния.

Проведенные в ИЭМИ эксперименты показали также возможность управления границами спектра фрактальных сигналов. Для этого при создании фрактальных сигналов, достаточно выбрать соответствующие параметры  $\xi$  и  $f_0$  в аналитическом выражении для их временной реализации и перенести сигнал по спектру с помощью соответствующей несущей. С помощью параметра  $\xi$  можно изменять лакуарность фрактального спектра, т.е. изменять величину „пустот“ в нем. Для  $\xi = 1/2$  лакуарность исчезает, и мы получаем сплошной спектр фрактального сигнала в виде ступеньки. Такого типа спектры характерны для ЛЧМ сигналов. Изменение лакуарности в спектрах фрактальных сигналов наблюдалось экспериментально. Для этих целей создавались аналоговые сигналы с разными  $\xi$ .

## Блок-схема и компоненты фрактальной системы связи

Основой фрактальной системы связи является использование в качестве носителей информации сигналов с фрактальными спектрами. ФСШП-сигналы являются помехозащищенными [1], и их с успехом можно использовать при передаче информации в сложной электромагнитной обстановке. Фактически разработанная ФСС является цифровой связью, в которой прямоугольные импульсы заменены на фрактальные сигналы. При этом наличие фрактального сигнала соответствует передаваемому символу „1“, а отсутствию сигнала — символу „0“. На рис. 3 показан пример кодирования информации с помощью фрактальных сигналов.

На рис. 4 представлена блок-схема канала передачи данных между двумя компьютерами с помощью фрактальных сигналов. Сигнал с выхода передающего

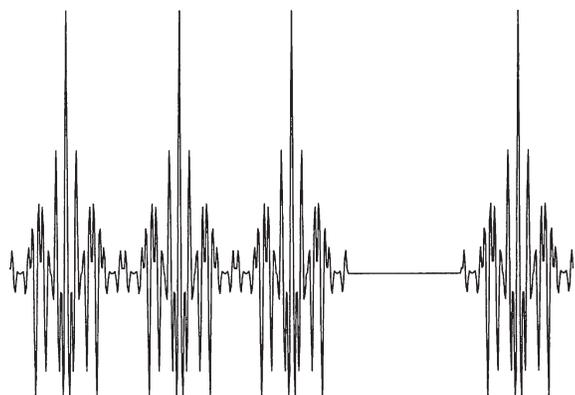


Рис. 3. Кодирование последовательности (11101) с помощью фрактальных вейвлетов.

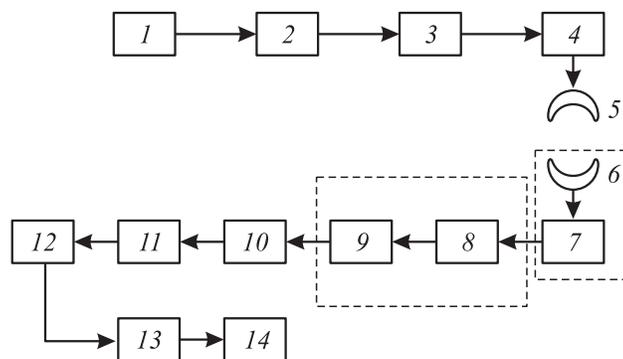


Рис. 4. Структурная схема канала передачи данных фрактальными сигналами между двумя компьютерами: 1 — передающий компьютер; 2 — преобразователь интерфейса; 3 — вейвлетный генератор; 4 — фрактальный передатчик; 5 — передающая широкополосная антенна; 6 — приемная фрактальная антенна; 7 — фрактальный фильтр высоких частот; 8 — фрактальный приемник; 9 — полосовой фильтр низких частот; 10 — детектор; 11 — компаратор; 12 — схема восстановления прямоугольного импульса; 13 — преобразователь интерфейса; 14 — принимающий компьютер.

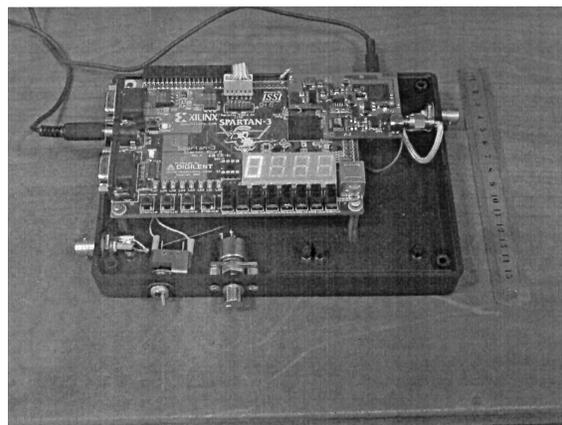


Рис. 5. Вейвлетный генератор.

компьютера (1, рис. 4) передается на преобразователь интерфейса (2, рис. 4), после чего информационный сигнал поступает на специально разработанный вейвлетный генератор (ВГ) (3, рис. 4), который по команде, задаваемой входящим прямоугольным импульсом, формирует аналоговый сигнал заранее запрограммированной формы. Цифровая часть ВГ использует программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Благодаря использованию перепрограммируемой памяти ВГ позволяет получать 20 и более видов сигналов, в том числе и ортогональных, используемых в системах связи. Для ФСС в память ВГ вводится ортогональная система фрактальных сигналов. Основу ВГ составляет ЦАП, который позволяет формировать сигналы с 4096 уровнями квантования. Максимальная программируемая амплитуда сигнала составляет 2 V. Для обеспечения требований по динамическому диапазону с учетом высокой частоты дискретизации формируемых сигналов ВГ выполнен на 4-слойной печатной плате.

На рис. 5 представлена фотография ВГ.

С выхода ВГ сигнал подается на фрактальный передатчик (4, рис. 4), в котором осуществляются полосовая модуляция и усиление сигнала, после чего результирующий фрактальный сигнал на несущей частоте 2 GHz излучается в эфир передающей широкополосной антенной (5, рис. 4). Модулятор и фрактальный передатчик, изготовленный в ИЭМИ на основе собственной разработки, работает в полосе частот 1.8–2.15 GHz. В качестве передающей в данной модификации используется широкополосная антенна.

Для приема сигнала используется широкодиапазонная фрактальная антенна (6, рис. 4), сигнал с которой поступает через фрактальный фильтр высоких частот (7, рис. 4) на вход фрактального приемника (8, рис. 4). В приемнике осуществляются усиление и выделение модулирующего сигнала из принятого высокочастотного сигнала.

Для улучшения работы ФСС в очень сложной электромагнитной обстановке можно использовать корреля-

тор фрактальных сигналов, однако для коммерческих устройств его использование нецелесообразно, поскольку такое устройство имеет высокую стоимость, и его применение в итоге увеличит стоимость всей ФСС.

Для борьбы с помехами в системе предусмотрены широкодиапазонные фрактальные фильтры (ФФ).

Очищенный с помощью ФФ от помех аналоговый сигнал поступает на схему восстановления прямоугольного импульса (10, рис. 4), где он преобразуется в цифровой сигнал. Схема восстановления прямоугольного импульса предназначена для формирования по длительности битов информации и выявления в информационном потоке начала и конца пакетов. На входе схемы восстановления прямоугольного импульса установлен компаратор. На его выходе формируется прямоугольный импульс, соответствующий биту информации в цифровом потоке. В качестве компаратора применена быстродействующая серийная микросхема, которая формирует положительный импульс уровня ТТЛ по каждому пику видеосигнала длительностью не менее 0.75 ns. Сигнал с выхода компаратора подается на преобразователь интерфейса (11, рис. 4). Далее цифровые данные поступают на USB-порт принимающего ПК (12, рис. 4), в котором преобразуются в данные, согласующиеся с логикой операционной системы. Для этой цели используется специально разработанное программное обеспечение.

Преобразователи интерфейсов USB в RS-485 и RS-485 в USB предназначены для согласования скоростей передачи информации порта USB (12 Mbit/s) и устройств, входящих в канал передачи данных фрактальными сигналами (0.9216 Mbit/s), а также для формирования сигналов запуска, поступающих на ВГ.

В ИЭМИ разработана технология изготовления фрактальных антенн и фильтров, используемых в описанной ФСС. Используемые фрактальные антенны [3] имеют круговую диаграмму направленности, что обусловлено их применением в данной системе связи (рис. 6).

На стендах ИЭМИ были впервые реализованы эфирная и кабельная ФСС. Обмен информацией происходил между компьютерами на несущей частоте 2 GHz широкодиапазонными сигналами с фрактальными спектрами (рис. 2) по эфиру на расстояние до 100 м, а также по 50-метровому кабелю типа В3199. Связь между компьютерами с помощью фрактальных видеосигналов

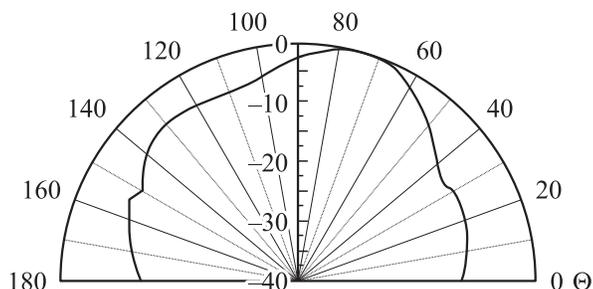


Рис. 6. Характерная диаграмма направленности фрактальных антенн.

Параметры фрактальной системы связи

Параметры	Фрактальная система связи
Скорость передачи данных, Mbit/s	0.9216
Широкополосность, MHz	500–640
Вид модуляции	Амплитудная, фазовая
Выходная мощность, dBm	1–15
Чувствительность, dBm	–130
Рабочий диапазон частот, GHz	2–10.1
Дальность, m	100

осуществлялась только по кабелю. Испытание ФСС проводилось в условиях внешних помех. Оказалось, что ФСС передает информацию без искажений при соотношении сигнал/шум на входе приемника, равном –10 dB. Измерения соотношения сигнал/шум проводились в полосе частот фрактального сигнала. На экспериментальном стенде были измерены основные параметры ФСС, которые приведены в таблице.

Используемое оборудование позволяло реализовать различные типы СШП-сигналов. Для этих целей использовался стандартный Arbitrary Waveform Generator AWG 2041, который мог генерировать аналоговый сигнал по соответствующему цифровому сигналу, введенному заранее в его память. Частота оцифровки данного генератора равнялась 1 GHz. В результате проведенных экспериментов было показано, что другие типы СШП-сигналов не влияют на передачу информации с помощью ФСС. Таким образом, ФСС может обеспечить эффективное кодовое разделение абонентов и конфиденциальность при несанкционированном доступе к передаваемой информации.

Для ФСС в ИЭМИ разработан компактный программируемый под конкретную задачу аналог Waveform Generator, который нами назван вейвлетным генератором. Этот генератор способен генерировать систему ортогональных аналоговых сигналов на основе базового вейвлета [4]. Как известно, свойство ортогональности сигналов широко применяется в системах связи. Таким образом, ВГ могут эффективно использоваться при разработке и производстве современных систем связи.

Сигналы с фрактальными спектрами могут использоваться не только в системах связи, но и для создания новых видов СШП-радаров. Преимущество таких ФССШП-радаров состоит в том, что они могут работать в разных диапазонах длин волн, являющихся самоподобными одновременно. Это дает возможность распознавать объект на разных масштабах, что ведет к значительному улучшению разрешающей способности ФШПС-радаров и открывает новые возможности для создания систем распознавания образов. Использование сигналов с фрактальными спектрами в локации имеет и другое преимущество. Оно связано с тем, что сигналы такого типа являются помехозащищенными и с их помощью можно уменьшить влияние помех на радиолокационные измерения.

## Заключение

В ИЭМИ впервые была разработана, изготовлена и испытана помехозащищенная система двухканальной фрактальной связи, предназначенная для работы в сложной электромагнитной обстановке и исключающая возможность несанкционированного доступа к передаваемой информации.

Разработанная система предназначена, как для передачи информации по кабельным линиям с помощью фрактальных видеосигналов, так и по эфиру, с использованием несущей, промодулированной сигналами с фрактальными спектрами различных видов. Создание и работоспособность системы обеспечили оригинальные разработки критических блоков, входящих в ее состав, таких как: программируемый генератор модулирующих сигналов, позволяющий формировать фрактальные сигналы более 20 различных видов; передатчик фрактальных сигналов; приемник фрактальных сигналов, включающий специально разработанные антенны.

Особое значение при создании данной системы играют специально разработанные фильтры, предназначенные для выделения фрактальных сигналов из шумов и других мешающих сигналов. Существенно, что такие фильтры повышают защищенность данной системы по отношению к воздействию мощных импульсных сигналов малой длительности.

Блоки и узлы, входящие в описанную систему фрактальной связи, разработаны и изготовлены таким образом, что большинство из них может быть использовано как компоненты при создании систем СШП-локации, специализированных систем связи и т. д.

Непрерывно улучшающиеся характеристики элементной базы, использованной нами, соответственно позволяют улучшать эксплуатационные характеристики следующих поколений фрактальной системы связи, что открывает широкие возможности для ее использования.

## Список литературы

- [1] Болотов В.Н., Ткач Ю.В. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 4. С. 91–98.
- [2] Болотов В.Н. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 2. С. 8–15.
- [3] Болотов В.Н., Киричок А.В., Ткач Ю.В. // Электромагнитные явления. 1998. Т. 1. № 4. С. 483–498.
- [4] Mallat S.A. Wavelet Tour of Signal Processing. San Diego: Academic Press, 1998. 577 с.