УДК 621.391

К.С. Васюта, А.Н. Барсуков, С.В. Озеров, Ф.Ф. Зоц

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

ФРАКТАЛЬНАЯ МОДУЛЯЦИЯ В РАДИОСВЯЗИ

В статье проанализированы свойства “фрактальной модуляции” и показана возможность ее применения для передачи информационных сообщений в несколько потоков в разных частотно-временных масштабах. Показано, что применение “фрактальной модуляции” существенно искажает информационное сообщение, которое трудно обнаруживается при несанкционированном доступе.

Ключевые слова: *дискретное вейвлет-преобразование, гомогенный сигнал, фрактальная модуляция.*

Введение

Известно, что фрактальные сигналы в системах передачи данных применяются достаточно давно, однако еще не достаточно изучено применение систем связи основанных на свойствах фрактальных сигналов в сложной электромагнитной обстановке. Поэтому, актуальной является задача передачи непрерывной или дискретной последовательности данных на фрактальной несущей по зашумленному и ненадежному, непрерывному по амплитуде и времени каналу радиосвязи, когда полоса пропускания или параметры длительности канала известны априорно или совсем не известны, например, каналы с замираниями или преднамеренными помехами.

Целью работы является обоснование возможности применения фрактальных преобразований (модуляции) сигналов для скрытой передачи цифровых сообщений в канале связи.

Основная часть

Рассмотрим возможность модуляции сигнала дискретным вейвлет-преобразованием, опираясь на результаты работ [1 – 3].

Опишем дискретное вейвлет-преобразование для сигнала $x(t)$ следующим образом:

$$x_{m,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\psi_{m,k}(t)dt \ , \qquad (1)$$

где $\psi(t)$ – вейвлет-функция, $x_{m,k}$ вейвлет-коэффициенты [3]. Тогда обратное дискретное вейвлет-преобразование будет иметь вид:

$$x(t) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x_{m,k}\psi_{m,k}(t) \ . \qquad (2)$$

Для увеличения скорости такого преобразования используется быстрый алгоритм *Mallet's* [3]. При этом вейвлет-коэффициент m может быть выражен в масштабе $m+1$ при помощи:

$$a_{m,k} = \sum_{l} h[l-2k]\, a_{m+1,l}, \qquad (3)$$

$$x_{m,k} = \sum_{l} g[l-2k]\, a_{m+1,l}, \qquad (4)$$

где h(n) и g(n) – понижающий и повышающий фильтры соответственно. На рис. 1 иллюстрируется реализация алгоритма быстрого дискретного вейвлет преобразования сигнала.

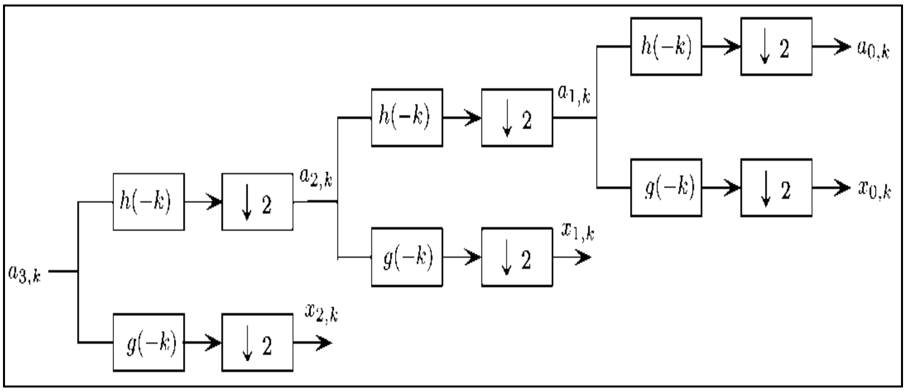

Рис. 1. Алгоритм вычисления дискретного вейвлет-преобразования

Восстановление масштабных коэффициентов $a_{m+1,k}$ осуществляется следующим образом:

$$a_{m+1,k} = \sum_{l} h[k-2l] a_{m,l} + g[k-2l]\, x_{m,l.} \qquad (5)$$

Выражение (5) позволяет осуществить инверсное дискретное вейвлет-преобразование. На рис. 2 приведен алгоритм, реализующий инверсное дискретное вейвлет преобразование набором синтезирующих фильтров.

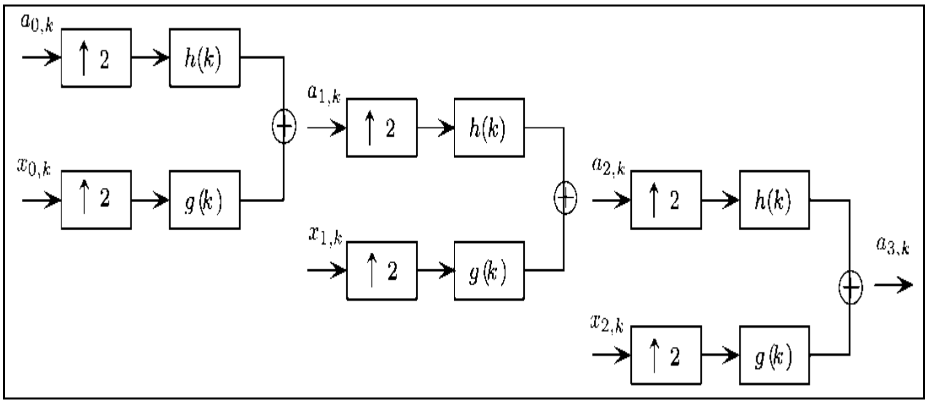

Рис. 2. Алгоритм вычисления инверсного дискретного вейвлет-преобразования

Понятие “фрактальная модуляция” основано на свойствах и характеристиках гомогенных (однородных) сигналов. Авторы *Wornell* и *Oppenheim* в работе [4] первыми отметили, что процессы с самоподобными свойствами наблюдаются в случайных физических явлениях, более того самоподобные процессы сохраняют свои характеристики, изменяясь во времени. Показано, что автокорреляционная функция таких процессов, обладает свойством масштабной инвариантности в пределах амплитудного множителя. Кроме того, в работе показано, что свойством самоподобия (масштабной инвариантности характеристик) обладают и детерминированные процессы, которые являются инвариантными в пределах амплитудного множителя при произвольном масштабировании во времени.

Таким образом, гомогенный, изменяющийся во времени сигнал $x(t)$, является самоподобным сигналом, соответствующим детерминированному свойству масштабной инвариантности:

$$x(t) = 2^{-nH} x(2^n t), \tag{6}$$

для любого целого n, коэффициент H – масштабирующий коэффициент самоподобия (показатель Херста). Этот класс сигналов целесообразно использовать для “фрактальной модуляции”. В [4] показано, что гомогенные сигналы могут быть применены для модуляции формы сигналов в каналах связи с неизвестной длительностью и пропускной способностью. Такие сигналы легко восстанавливаются на коротком интервале наблюдения при заданной пропускной способности системы передачи данных. Гомогенные сигналы могут быть легко получены через вейвлет-преобразование.

Ортогональное вейвлет-преобразование сигнала $x(t)$ описывается с точки уравнений синтеза [5] как (1), (2). Основные функции ортогонального вейвлет-преобразования связаны согласно:

$$\psi_{m,k}(t) = 2^{m/2} \psi(2^m t - k), \tag{7}$$

где $\psi(t)$ представляет базовую вейвлет-функцию, а m, k – индексы расширения и преобразования соответственно [5 – 9]. Когда $x(t)$ – гомогенный сигнал, из выражения (1) следует, что вейвлет-коэффициенты принимают форму:

$$x_{m,k} = \beta^{-m\backslash 2} x_{0,k} , \tag{8}$$

где $\beta = 2^{2H+1}$. Принимая, $q[k]$ за $x_{0,k}$ (чтобы встроить информационную последовательность в сигнал), выражение (2) принимает вид:

$$x(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \beta^{-m|2} q[k] \psi_{m,k}(t). \tag{9}$$

Из выражения (8) следует, что $x(t)$ полностью определен с точки зрения q[k], которая является генерированной последовательностью для гомогенного сигнала $x(t)$. Частотно-временной портрет гомогенного сигнала, показан на рис. 3. Синтез гомогенных сигналов выполняется путем репликации последовательности q[k] в представление каждого масштаба (7), с точки зрения ортогонального вейвлет-базиса [10, 11].

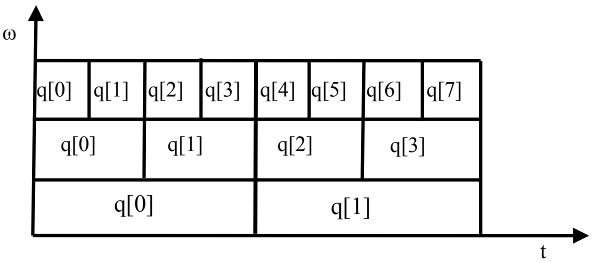

Рис. 3. Частотно-временной портрет гомогенного сигнала (при $H = ½$)

Для реализации алгоритма внесения информационной последовательности q[k] в гомогенный сигнал x(t) достаточно использовать q[k] как коэффициент расширения в самоподобном ортонормированном вейвлет-преобразовании

$$x(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \beta^{-m|2} q[k] \psi_{m,k}(t). \tag{10}$$

Из уравнения (10) следует, что умножая данные q[k] на $\beta^{-m|2}$, а затем, модулируя их на группу ортогональных базовых вейвлет-функций, можно создать детерминированный самоподобный сигнал x(t), который является фрактальным. Такой вид преобразования фрактального сигнала называется “фрактальная модуляция”.

На рис. 4 в верхней части показана выборка белого шума, который демонстрирует статистическое самоподобие, а в нижней части – переданный детерминированный самоподобный сигнал x(t) с фрактальной модуляцией.

Результаты показывают эффективный способ встраивания потока символов q[k] в гомогенный сигнал x(t). Такой подход – основа фрактальной модуляции [12].

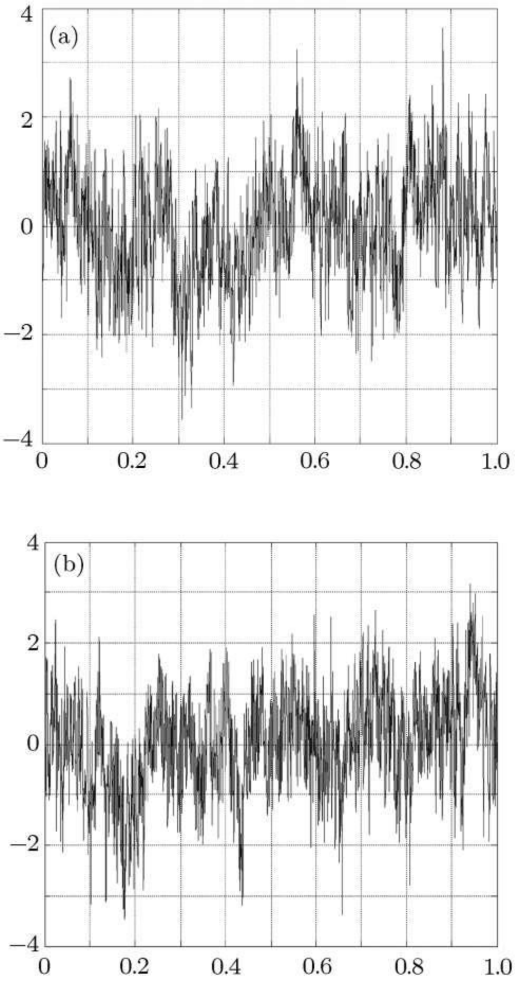

Рис. 4. Белый шум(а) и гомогенный сигнал с фрактальной модуляцией (b)

Рис. 5 иллюстрирует частотно-временной портрет фрактальной модуляции сигнала. Из анализа рисунка следует, что одно и то же сообщение передается в полосе частот на множестве потоков одновременно.

Такая характеристика получена из теории вейвлетов [3] и известна как многоскоростное разнообразие.

Многоскоростное разнообразие является важной характеристикой фрактальной модуляции, одно и то же сообщение передается в нескольких частотно-временных масштабах, в нескольких потоках одновременно, то есть многомасштабный синтез – принципиальное отличие метода ”фрактальной модуляции” от других методов модуляции.

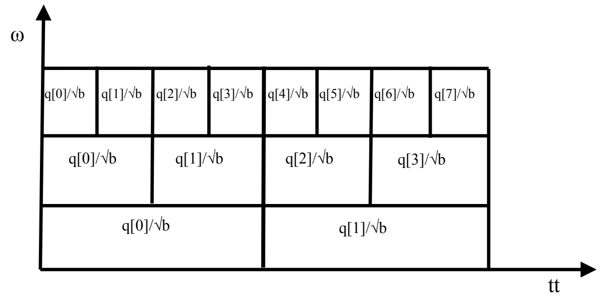

Рис. 5. Частотно-временной портрет переданного сигнала с фрактальной модуляцией (при H =½)

В выражении (10) значение индекса m – бесконечно, поэтому это не осуществимо на практике. Модуляция возможна в ограниченном диапазоне, $\mu=\left[M_L, M_{L+1},...,M_U\right]$ – диапазон m, который имеет конечное значение. Такой вид модуляции имеет два преимущества.

Во-первых, фрактальная модуляция делит спектр передачи на несколько полос, так что информация передается с разной скоростью в разных диапазонах частот.

Соответственно, при помощи “фрактальной модуляции”, возможно передавать и принимать сигналы с разной скоростью, при любой комбинации пропускной способности каналов передачи, чьи характеристики иногда не достаточно известны передающей стороне (например, замирание каналов, множественный доступ и т.п.). Во-вторых, путем выбора необходимых значений масштабного коэффициента, пропускная способность приводится к требованиям канала и системы связи, что делает систему связи более адаптивной к электромагнитной обстановке.

В выражении (10) информационная последовательность имеет бесконечную длину. Это не достижимо на практике, так как длина сообщения ограниченна фактической модуляцией. В таком случае длина q[k]=L, то есть q[k]=0, k>0 k>L-1. В то же время для того, чтобы эффективно использовать частотный диапазон последовательность $q\left[k\right]$ будет периодически встраиваться:

$$x(t)=\sum_{m\in\mu}\sum_{k}\beta^{-/2}q\left[k \bmod L\right]\psi_{m,k}(t), \qquad (11)$$

если считать $q=\left\{q\left[0\right]q\left[1\right]...q\left[L-1\right]\ \right\}$.

Использование этого свойства фрактальной модуляции позволяет не только принимать сигнал на различных скоростях, но и дает возможность в выборе времени начала приема. Приемник может динамически выбирать соответствующую скорость и пропускную способность исходя из электромагнитной обстановки. Этот метод передачи сигнала (периодической передачи) использует все преимущества частотно-временной локализации вейвлета. Таким образом, можно использовать приемники с различными частотными диапазонами, чтобы получить информацию в различные периоды времени. Для низкочастотных приемников требуется узкая полоса пропускания, но и более длительное время приема. Для высокочастотного приемника необходима широкая полоса частот, но и время приема может быть сокращено. Кроме того, такой способ передачи сигнала дает возможность проектировать и применять приемные устройства с временным и частотным разделением каналов.

Выводы

Таким образом, в работе показаны особенности фрактальной модуляции и возможность применения преобразованного гомогенного сигнала для передачи информационных сообщений в несколько потоков в разных частотно-временных масштабах. Это, в свою очередь, дает возможность принимать информационное сообщение на различных скоростях и в определенное время приема. Кроме того, применение "фрактальной модуляции" существенно искажает информационное сообщение, которое трудно обнаружить при несанкционированном доступе. Это свойство повышает помехозащищенность (скрытность) системы связи и развивает стеганографические методы передачи и хранения информации.

Список литературы

1. *Mallet S G Trans. Pattern Anal. Machine Intell / Mallet S G // 1989 - IEEE PAMI-11 674.*
2. *Daubechies I Commun. Pure Appl. Math / Daubechies I //1988 – 41 909.*
3. *Daubechies I Ten Lectures on Wavelets / Daubechies I // Philadelphia: SIAM Pub, 1992. – P. 53.*
4. *Wornell G.W. and Oppenheim Trans. on Information Theory / Wornell G W and Oppenheim // A V- 1992 – IEEE 38785.*
5. *Grossman A. and Morlet Mathemat. Analysis/ Grossman A and Morlet // J 1984 - SIAM J. 15 723.*
6. *Haar A. Math. Ann. / Haar A. //1990-69 331.*
7. *Strang G. / G Strang // 1994 – American Scientist – 82250.*
8. *Strang G. SIAM / Strang G //1989 – American Scientist SIAM Rev. – 31 614.*
9. *Strang G. Wavelets and Filter Banks / G. Strang and T.Q. Nguyen. – 1996-Wellesley, MA: Wellesley-Cambridge. – 235 p.*
10. *Mallet S.G. Trans. Pattern Anal. Machine InTell / S.G. Mallet // 1989 – IEEE PAMI-11674.*
11. *Mallet S.G. Trans. Am. Math. Soc / S.G. Mallet // 1989 – 315 69.*
12. *Yuan Yong, Shi Si-hong Multirate diversity strategy of fractal modulation / Yuan Yong, Shi Si-hong // Chin. Phys. – 2011. – Vol. 20. – No 4. – 040509.*

Поступила в редколлегию 20.07.2012

Рецензент: д-р техн. наук проф. П.Ю. Костенко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ФРАКТАЛЬНА МОДУЛЯЦІЯ В РАДІОЗВ'ЯЗКУ

К.С. Васюта, А.Н. Барсуков, С.В. Озеров, Ф.Ф. Зоц

В статті проаналізовані властивості "фрактальної модуляції" показана можливість її застосування для передачі інформаційних повідомлень в декілька потоків в різних частотно-тимчасових масштабах. Показано, що застосування "фрактальної модуляції" істотно спотворює інформаційне повідомлення, яке важко виявляється при несанкціонованому доступі.

Ключові слова: *дискретне вейвлет – перетворення, фрактальна модуляція, гомогенний сигнал.*

FRACTAL MODULATION IN THE RADIO COMMUNICATION

K.S. Vasuta, A.N. Barsukov, S.V. Ozerov, F.F. Zots

The properties of "fractal modulation" are analysed in article, and possibility of its application for transfer of information reports to some streams to the different frequency- time scales is shown. It is shown that application of "fractal modulation" essentially distorts the report of information which is difficultly found out at unapproved access.

Keywords: *discrete wavelet transforms, a homogeneous signal, fractal modulation.*