

*Досліджено можливості використання різних вейвлет базисів для побудови систем радіодоступу МІМО з ортогональним пакетним вейвлет мультиплексуванням і запропонований адаптивний метод придушення завад на основі вибору оптимальної структури вейвлет дерев*

*Ключові слова: системи радіодоступу МІМО, ортогональне пакетне вейвлет мультиплексування, вейвлет дерево*

*Исследованы возможности использования различных вейвлет базисов для построения систем радиодоступа МІМО с ортогональным пакетным вейвлет мультиплексированием и предложен адаптивный метод подавления помех на основе выбора оптимальной структуры вейвлет деревьев*

*Ключевые слова: системы радиодоступа МІМО, ортогональное пакетное вейвлет мультиплексирование, вейвлет дерево*

*Possibilities of the use of different wavelet bases are investigational for the construction of the systems of radioaccess of MIMO with orthogonal package wavelet multiplexing and the adaptive method of dejaming is offered on the basis of choice of optimal structure of wavelet trees*

*Keywords: systems of radioaccess of MIMO, orthogonal package wavelet multiplexing, wavelet tree*

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОРТОГОНАЛЬНОГО ПАКЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ МУЛЬТИ- ПЛЕКСИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ РАДИОДОСТУПА МІМО

**А. В. Марчук**

Ассистент

Кафедра телекоммуникационных систем  
Харьковский национальный университет

радиоэлектроники

пр. Ленина 14, г. Харьков, Украина, 61166

Контактный тел.: 702-13-20

E-mail: tsm-01-2@ukr.net

Число радиосредств в мире постоянно растет. Это приводит к увеличению плотности источников излучения и ухудшению помеховой обстановки для систем радиодоступа. С другой стороны системы радиодоступа, как правило, работают в условиях многолучевого канала и сигналы в них подвержены частотно селективным замираниям. В современных высокоскоростных системах радиодоступа с многими пространственными каналами МІМО для борьбы с частотно селективными замираниями используется техника ортогонального частотного мультиплексирования OFDM в отдельных каналах [1]. Отключение поднесущих частот с замираниями при этом приводит к снижению пропускной способности системы связи. При воздействии помех сосредоточенных на одной или нескольких фиксированных частотах, совпадающих с поднесущими частотами OFDM, для подавления помех в таких системах может использоваться механизм аналогичный механизму борьбы с замираниями. Однако при воздействии импульсных (достаточно широкополосных) периодически повторяемых помех на систему радиодоступа с OFDM все поднесущие частоты на время действия помехи не работоспособны. OFDM имеет и другие недостатки: невысокую спектральную эффективность из-за ве-

дения защитных частотных интервалов между подканалами; высокий уровень бокового излучения за пределами основного лепестка АЧХ, составляющий примерно –14 дБ.

Поэтому актуальной является задача разработки методов уменьшения частотного интервала между рабочими полосами частот соседних систем связи за счет повышения спектральной эффективности систем радиодоступа, а также методов, обеспечивающих эффективное подавление различных видов помех в системах радиодоступа МІМО.

В последние годы появился ряд работ [2, 3] посвященных новому способу мультиплексирования подканалов – ортогональному пакетному вейвлет мультиплексированию, которое обладает достоинствами OFDM и в то же время не имеет свойственных ему недостатков. Такое мультиплексирование позволяет более эффективно использовать частотный диапазон и осуществлять локализацию помех в частотной и временной области.

Основная идея данного метода – применение обратного пакетного вейвлет преобразования для объединения сигналов на передаче и прямого пакетного вейвлет преобразования на приеме для разделения сигналов.

В обычном алгоритме быстрого вейвлет – преобразования (БВП) Маллата при переходе с масштабного уровня  $m$  на уровень  $m+1$  функция аппроксимирующих коэффициентов  $c_{m+1,k}$  разделяется на низкочастотную ( $c_{m+1,k}$ ) и высокочастотную ( $d_{m+1,k}$ ) части спектрального диапазона, и при дальнейшем увеличении масштабных уровней аналогичному разложению последовательно подвергаются только низкочастотные функции, их называют аппроксимирующими. В отличие от алгоритма Маллата в пакетном алгоритме БВП операция последовательного частотного расщепления применяется как для низкочастотных (НЧ) (аппроксимирующих), так и для высокочастотных (ВЧ) (детализирующих) коэффициентов. В результате возникает дерево расщепления, пример которого (в предельной форме расщепления на всех уровнях) показан на рис. 1.

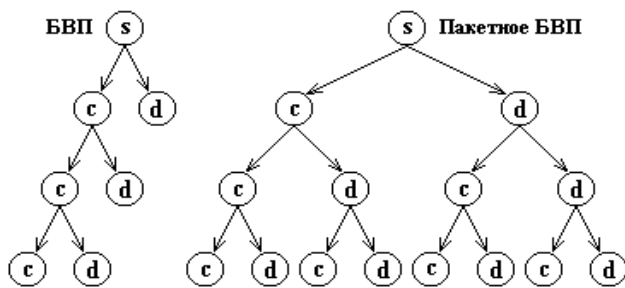


Рис. 1. Деревья быстрого вейвлет преобразования Маллата и пакетного быстрого вейвлет преобразования до 3-го уровня разложения

При таком расщеплении вейвлеты каждого последующего уровня образуются из вейвлета предыдущего уровня разделением на два новых вейвлета

$$\psi_1(t) = \sum_n h_n \psi(t-n), \quad \psi_2(t) = \sum_n g_n \psi(t-n).$$

Новые вейвлеты также локализованы в пространстве, но на вдвое более широком интервале. Полный набор вейвлетных функций разложения называют вейвлет-пакетом.

Ветвям дерева соответствует набор подпространств сигнала с базисами, построенными, как и для однобокого дерева, согласно кратно-масштабному анализу (КМА). Функции и фильтры, порождающие эти базисы, называются соответственно вейвлет-пакетами и пакетными фильтрами.

Если исходные вейвлет-фильтры ортогональны, то и схема любой конфигурации дерева является ортогональной, поскольку она есть каскадное соединение ортогональных фильтров.

При пакетном БВП процесс расщепления выполняется как для НЧ, так и ВЧ составляющих сигнала. В результате получается «полное» (бинарное или сбалансированное) дерево, представленное на рис. 2. Субполосные преобразования, можно рассматривать как фильтрацию с последующим прореживанием в два раза. В данном случае имеется два вида фильтров НЧ ( $h_n$ ) и ВЧ ( $g_n$ ) составляющих, так называемый банк фильтров.

При использовании стандартных обозначений функций вейвлет разложения, дерево представляется в виде рис. 3, а распределение диапазонов частот фильтров в конечных узлах дерева как показано на рис. 4.

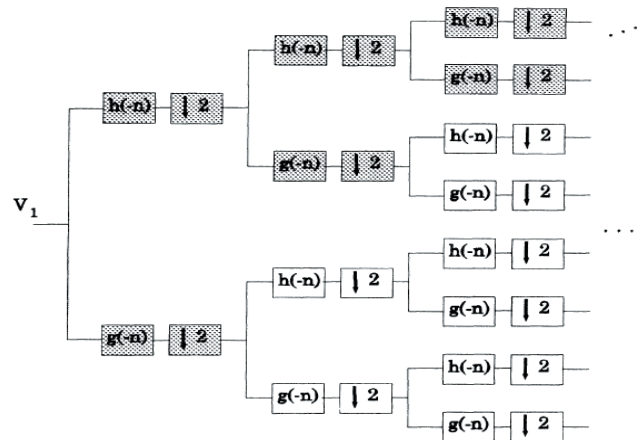


Рис. 2. Представление дерева до третьего уровня разложения пакетного вейвлет преобразования в виде банка НЧ и ВЧ фильтров с прореживанием на 2

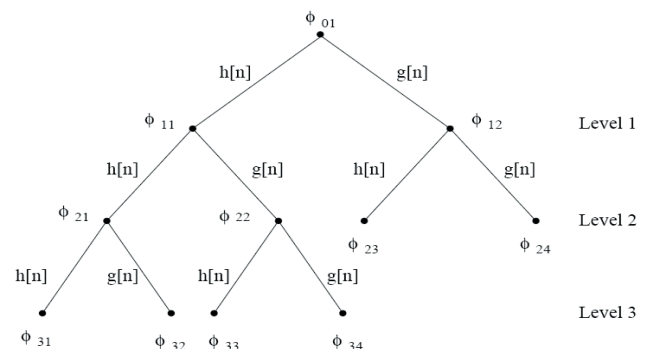


Рис. 3. Представление части дерева до третьего уровня разложения пакетного вейвлет преобразования в виде узлов

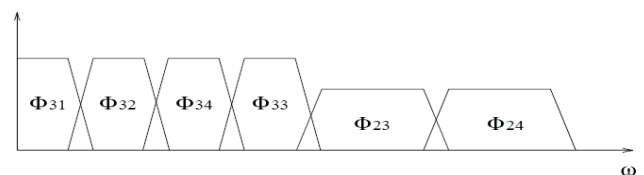


Рис. 4. АЧХ фильтров для функций в конечных узлах ветвей дерева, представленного на рис. 3

Вышесказанное, в том числе главное свойство вейвлет функций – их ортогональность, дают возможность построить систему подобную традиционной OFDM, но на вейвлетах [2,3]. Однако в ММО системах они не применялись.

В данной работе предлагается встраивать механизм ортогонального пакетного вейвлет мультиплексирования в системы радиодоступа ММО (рис. 5). Данные от источника сообщений после преобразования в  $N$  параллельных потоков по числу каналов системы ММО (на рис. 5 блок преобразования не показан) подаются на модуляторы МД каналов. В каждом из каналов поток символов поступает на преобразователи последовательного потока в параллельный ПР ПС/ПР с числом подканалов, организуемых в системе ортогонального пакетного вейвлет мультиплексирования ОПВМ. После обработки сигналов в блоках обратного пакетного дискретного вейвлет пре-

образования IDWT и преобразования в аналоговую форму в цифро-аналоговых преобразователях ЦАП сигналы модулируют несущую частоту от генератора Г, а затем после усиления в усилителях мощности УМ излучаются через антенны в свободное пространство. На схеме (рис. 5) антенны не показаны, а параметры радиоканала заданы матрицей Н.

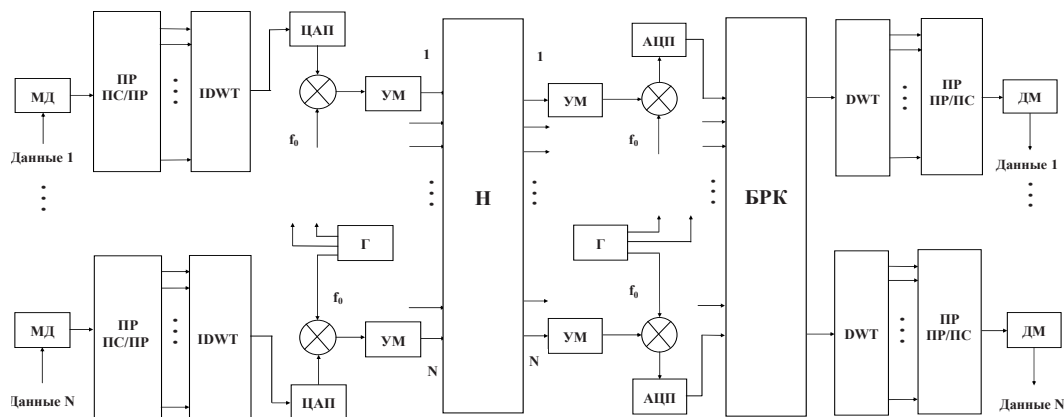


Рис. 5. Система радиодоступа MIMO с ортогональным пакетным вейвлет мультиплексированием в канале

На приемной стороне осуществляются обратные операции по предварительному усилению, переносу колебаний в низкочастотную часть спектра и решению задачи разделения каналов в системе MIMO в блоке БРК. Затем в каналах выполняется прямое пакетное дискретное вейвлет преобразование DWT с последующим преобразованием цифровых потоков в последовательные потоки и демодуляцией в демодуляторах ДМ. Данные из N каналов на последнем этапе обработки объединяются в один поток в преобразователе параллельных потоков в последовательный (на рис. 5 не показан).

Для исследования возможностей ортогонального пакетного вейвлет мультиплексирования в системах MIMO была создана программная модель в среде MatLAB. Были проведены исследования влияния выбора типа вейвлет функции на параметры ОПВМ. Оказалось, что вейвлет haar, дающий хорошие результаты в фильтрации шумов при вейвлет обработке [4] не обеспечивает высоких показателей при использовании для мультиплексирования в ОПВМ по полосе занимаемых частот. На рис. 6,а приведены АЧХ 8-ми канальной ОПВМ для двух случаев вейвлет обработки: с использованием функции haar и db16 с подачей сигнала на входы – узлы вейвлет дерева 4-го уровня

разложения. Применение функции Добеши db16 позволяет существенно сократить полосу занимаемых частот. Следует отметить чрезвычайно сильное подавление боковых частот в обоих случаях. В случае db16 уровень боковых частот меньше -50 дБ.

Использование функций Daubechies более высоких порядков позволяет сэкономить занимаемую полосу

не так значительно, как при замене функции Haar на db16 (рис. 6,б).

Следует подчеркнуть наличие очень сильного подавления сигнала за пределами основной полосы частот, уровень боковых частот ниже -50 дБ и еще больше снижается при увеличении порядка функции Daubechies.

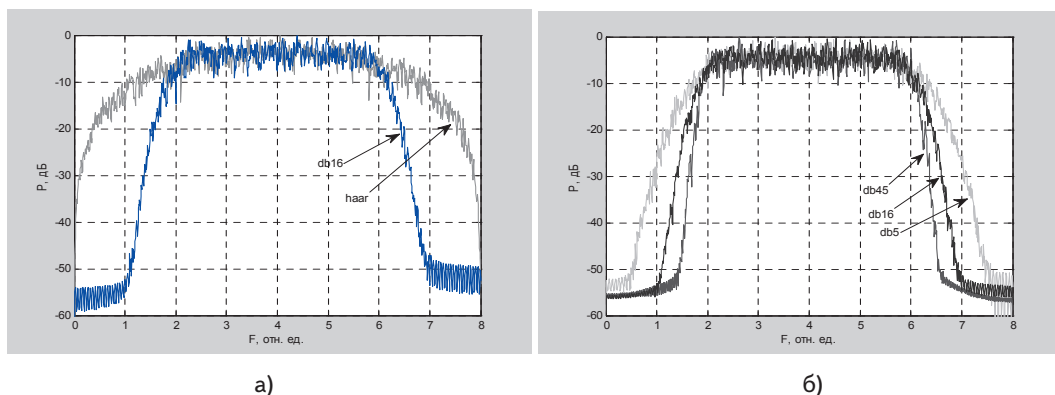


Рис. 6. Сравнение АЧХ для 8-ми канальной ОПВМ системы MIMO с использованием функций haar, db5, db16 и db45 с подачей сигнала на входы – узлы вейвлет дерева 4-го уровня разложения

Использование функций Symlets в ОПВМ системы MIMO дает практически те же результаты, что и использование функций Daubechies при одинаковом их порядке.

Применение функций Coiflets дало следующие результаты: ширина занимаемой полосы частот при использовании максимально возможного в программной среде Matlab порядка вейвлет функции равного пяти coif5 меньше, чем для db5, но больше, чем для db16. Таким образом, использование функций Coiflets в системах ОПВМ MIMO не целесообразно.

Использование вейвлет функции DMeuег в системе ОПВМ MIMO, не имеющей деления на порядки дало тот же результат, что и применение функции Daubechies 45-го порядка. При проведении цифровой обработки в системе Matlab обработка массивов данных для всех исследованных функций кроме dmeuег выполнялась практически мгновенно, а для dmeuег явно выделилась в худшую сторону, отличаясь непомерно большими

затратами времени. Естественно, что Matlab, являясь универсальной системой, может быть не оптимизирован под решение конкретной задачи, но в любом случае потери времени будут больше, чем для других функций. Следовательно, функцию DMeuer применять в системе ОПВМ МИМО не целесообразно.

Таким образом, на основе проведенного анализа можно рекомендовать применение в системах ОПВМ МИМО функций Daubechies и Symlets высоких порядков.

Было проведено сравнение систем ОПВМ с системой ортогонального частотного мультиплексирования OFDM при одинаковой скорости передачи информации (рис. 7). ОПВМ дает возможность сузить АЧХ. При соответствующем подборе вейвлет функций АЧХ ОПВМ МИМО почти в два раза уже. При неправильном выборе вейвлет функций выигрыш может снизиться на 25% (в случае вейвлет функций семейства Haar).

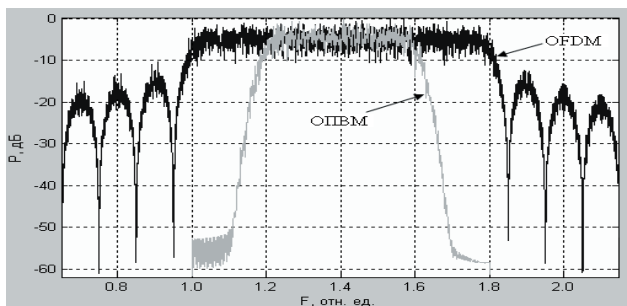


Рис. 7. АЧХ 8-ми канальных систем OFDM МИМО и ОПВМ МИМО (в ОПВМ используется пакетный вейвлет db16; входные потоки сигналов подаются на узлы 4,04; 4,05; 4,06; 4,07; 4,08; 4,09; 4,10; 4,11 вейвлет дерева)

При заданном отношении сигнал/шум спектральная эффективность системы МИМО NxN может достигать в идеале значений в N раз больших спектральной эффективности систем с одним пространственным каналом типа SISO.

Другой важной характеристикой ортогонального пакетного вейвлет мультиплексирования ОПВМ является значительно более низкий уровень мощности боковых частот (рис. 7). ОПВМ имеет уровень боковых в случае использования вейвлет функции db16 на 40 дБ более низкий, чем для OFDM. Это важно при решении задач электромагнитной совместимости. ОПВМ системы практически не создают помех за пределами рабочей полосы.

А значит, уровень ошибок на бит в системах снижается.

Исследуем возможности использования ОПВМ для борьбы с тоновыми и импульсными помехами.

Предположим, что на систему МИМО с ортогональным пакетным вейвлет мультиплексированием в собственных каналах МИМО воздействует внешняя помеха в радиоканале.

Рассмотрим два вида помех. Помехи «тоновые» – непрерывный синусоидальный узкополосный высокочастотный сигнал. Другой вид часто встречающихся помех – это импульсные помехи, периодически повторяющиеся с какой-то заданной частотой и широким спектром.

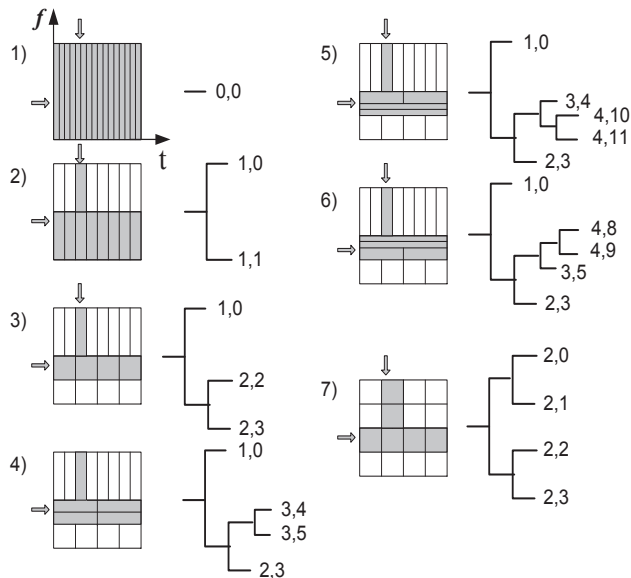


Рис. 8. Возможные конфигурации дерева ОПВМ при локализации ошибок и соответствующие окна на частотно-временной плоскости

На диаграммах рис. 8 представлены вейвлет деревья до четвертого уровня разложения. Если применить классическое разложение вида, представленного на рис. 2 с продолжением на 4-й уровень, то получим максимальное число входных узлов для блока IDWT ОПВМ равное 16.

Тогда параллельно можно будет подавать одновременно по 16 символов, назовем их блоком символов. Однако не обязательно этот блок передавать с помощью такого дерева. Возможны варианты конфигураций вейвлет дерева для передачи заданного блока символов, представленные на рис. 8. Первый случай, обозначенный 0,0, назовем вырожденным деревом без ветвей. Его мы будем использовать для сравнения.

Это случай, когда система ОПВМ вырождается, в такой системе всего один частотный канал и нет мультиплексирования каналов по частоте. Такая система - это система с временным разделением 16 символов, занимающая полосу частот, заштрихованную по вертикали.

Рассмотрим случай «тоновой» помехи, ширина спектра которой равна ширине заштрихованной полосы, на которую указывает горизонтальная стрелка на рис. 8, случай 3. Длительность импульсной помехи положим равной длительности передачи одного символа на рис. 8, случай 1, а занимаемая ею полоса частот равна заштрихованной области из двух полосок по вертикали на рис. 8, случай 3.

Если «тоновая» помеха действует по схеме 1 (рис. 8), обозначенной горизонтальной стрелкой, то будут поражены все 16 символов, т.е. будем иметь 16 ошибок на блок символов. Для кратковременной импульсной помехи периодически действующей, как показано на рисунке вертикальной стрелкой один раз за период передачи блока, будем иметь один пораженный символ, т.е. – одну ошибку на блок.

Конечно, могут иметь место и более сложные случаи, когда или ширина спектра «тоновой» помехи шире, или импульсы более длительные либо их не-

сколько и т.п. Такие случаи рассматривать не будем. Их можно будет изучать по аналогичному сценарию.

Следует подчеркнуть, что столь же незащищенной от такого рода помех окажется и система с частотным разделением символов. Только в этом случае, в отличие от обозначенного на рис. 8 случая 0.0, действие «тоновой» помехи приведет к одной ошибке (если ширина ее спектра не более ширины частотного канала), а импульсной – к 16 ошибкам (если ширина ее спектра равна полосе частот занимаемой всеми каналами).

Всего ошибок на блок символов будет, как и в случае 0.0, - 16.

Из анализа схем построения ОПВМ на рис. 8 следует, что для различных конфигураций вейвлет дерева будем иметь различное число ошибок при передаче символов. На рис. 8 пораженные (не верно переданные системой) символы показаны в виде заштрихованных прямоугольников. Сравнивая число пораженных символов для различных конфигураций вейвлет дерева, а значит и для различных алгоритмов работы ОПВМ можно оценить степень защищенности системы от помех.

Количество ошибок на один блок символов в системе ОПВМ с глубиной вейвлет разложения до 4-го уровня при воздействии одной «тоновой» и одной периодически повторяющейся импульсной помехи малой длительности, показанных стрелками на рис. 8, представлено в табл.1.

Таблица 1

Количество ошибок на один блок символов в системе ОПВМ 4-го уровня

Схема	1	2	3	4	5	6	7
Набор узлов – входов	0.0	1.0; 1.1	1.0; 2.2; 2.3	1.0; .3; 3.4; 3.5	1.0; 2.3; 3.4; 4.10; 4.11	1.0; 2.3; 3.5; 4.10; 4.11	2.0; 2.1; 2.2; 2.3
Кол.подканалов	1	2	3	4	5	5	4
Кол.ошибок	16	9	5	5	5	5	6

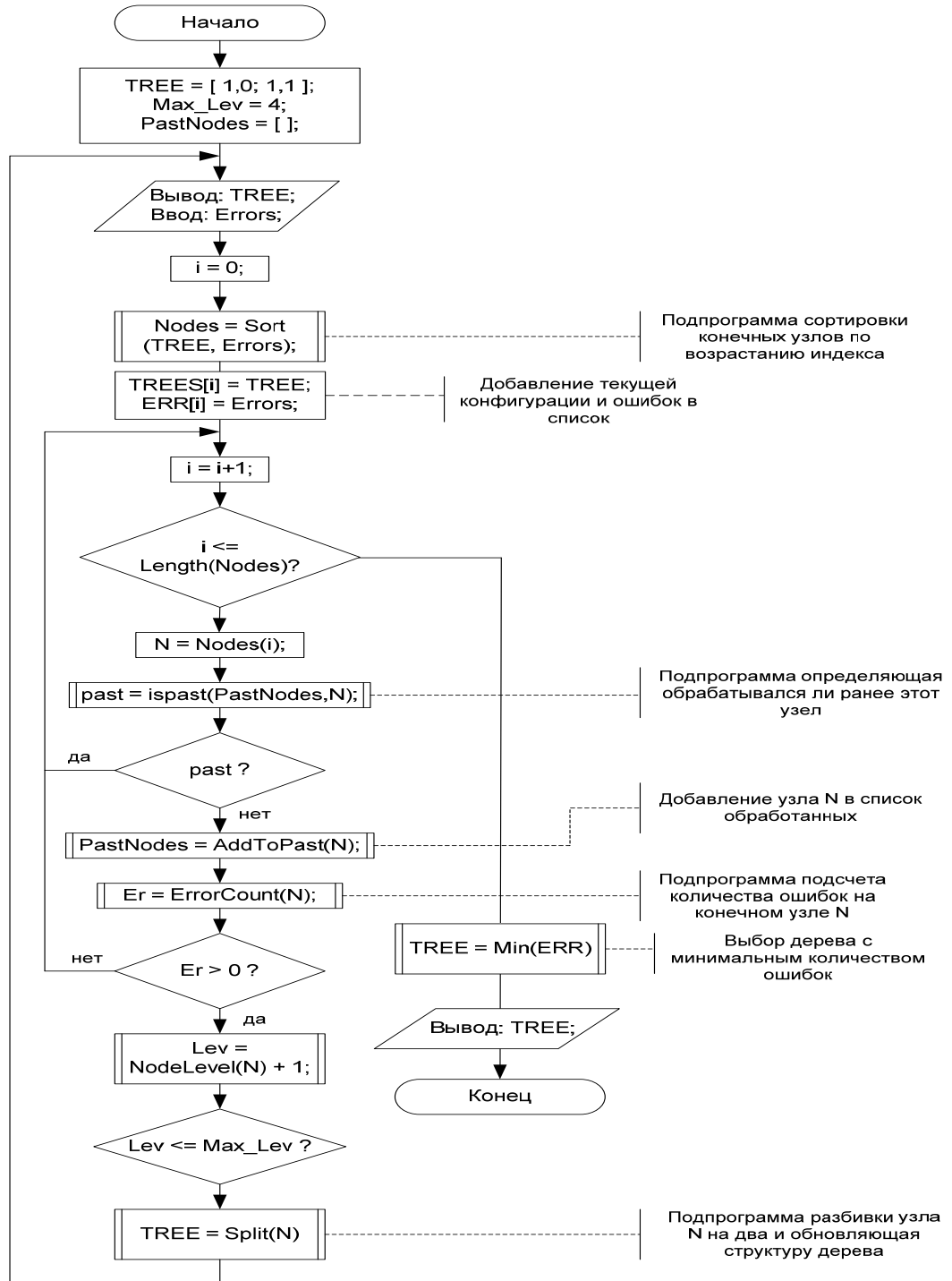


Рис. 9. Алгоритм поиска оптимального вейвлет дерева

Для рассматриваемого случая минимальное число ошибок равно 5 может быть реализовано схемами 3, 4, 5, 6. Если спектр импульсной помехи занимает весь диапазон частот системы, то число ошибок во всех схемах кроме 1 и 2-й увеличится на единицу. Выигрыш от оптимизации структуры вейвлет дерева составляет по числу ошибок в 2,67 раза. В случае большого числа узлов, например 256 и более выигрыш может быть и больше.

Разработан алгоритм поиска оптимального вейвлет дерева по минимуму ошибок на блок из  $N$  символов (рис. 9) для предлагаемого метода снижения уровня ошибок в системах радиодоступа ММО. Так как при полном разложении вейвлет дерева всегда имеет четное число ветвей, то  $N$  число четное.

Сначала выполняется инициализация, при которой задается начальная конфигурация вейвлет дерева (массив TREE) состоящей из двух конечных узлов 1.0 и 1.1, максимальное число уровня разложения. Также отводится память для сохранения туда индексов обработанных узлов (массив PastNodes).

Для текущей конфигурации дерева системой осуществляется передача и прием тестового пакета ОПВМ. Этот процесс на схеме алгоритма не показан для упрощения, так как алгоритм непосредственно использует лишь информацию о количестве возникших на каждом из конечных узлов дерева ошибках. Поэтому блок вывода конфигурации дерева и ввода массива Errors следует интерпретировать как применение в ОПВМ нового дерева, посылку тестового пакета, выявление ошибок на приеме и ввод информации об ошибках для дальнейшей работы алгоритма.

Формируется список конечных узлов Nodes, который поэлементно проверяется на наличие соответствующих им ошибок в массиве Errors. Если ошибки есть, то узел разбивается на два конечных узла следующего уровня. При обработке каждого элемента массива Nodes, он помечается обработанным (записывается в массив PastNodes).

Чтобы исключить повторную обработку алгоритмом обработанных ранее узлов перед каждой обработкой выполняется поиск в массиве PastNodes и если индекс текущего узла там присутствует, то алгоритм его не обрабатывает и переходит к следующему узлу.

При разбивке узла на два конечных узла обновляется текущая структура дерева (процедура Split) и заново составляется список конечных узлов Nodes. Посылается тестовый пакет и обновляется массив Errors. Алгоритм завершает свою работу после прохождения всех конечных узлов.

Блок IDWT ОПВМ можно реализовать программно для заданного уровня вейвлет разложения и в него

встроить выше приведенную программу оптимизации дерева. В этом случае система ОПВМ будет оптимальным образом осуществлять борьбу с указанными видами помех. В случае других видов помех по аналогии можно составить соответствующую программу оптимизации вейвлет дерева ОПВМ.

---

### Выводы

---

1. Применение ортогонального пакетного вейвлет мультиплексирования в системах радиодоступа ММО дает возможность сузить занимаемую системой полосу частот в сравнении с ортогональным частотным мультиплексированием в 1,5 - 2 раза и снизить уровень излучения за пределами рабочего диапазона частот на 40 дБ.

2. Амплитудно частотные характеристики системы радиодоступа ММО с ортогональным пакетным вейвлет мультиплексированием в каналах зависят от выбора базисной вейвлет функции и ее порядка, если функция его имеет. Для уменьшения занимаемой системой полосы частот можно рекомендовать функции Daubechies и Symlets высоких порядков.

3. Предложен метод адаптивного подавления как узкополосных так и широкополосных (периодических импульсных) помех в системах радиодоступа ММО с ортогональным пакетным вейвлет мультиплексированием на основе построения оптимальных вейвлет деревьев.

---

### Литература

---

1. Святкин В.С. и др. WiMAX – технология беспроводной связи : основы теории, стандарты, применение. – СПб.: БВХ-Петербург, 2005. - 368 с.
2. Monera-Llorca J, Lu W.S, Bhargava V.K. An improved wavelet-packet-division multiple access system // Conference on Communications, Computers and Signal Processing, 1999 IEEE Pacific Rim, pp. 495-498.
3. Zhong W.Z., Guo Q., Guo Y. Performance Evaluation of Wavelet Packet Modulation over Mobile Satellite Channel // Information Technology Journal, vol. 8, 2009, № 3.
4. Марчук А.В. Адаптивный к сигнально-помеховой обстановке метод цифровой обработки сигналов на основе вейвлет преобразований в приемных каналах систем радиодоступа ММО // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010, № 1/5. С. 25 – 28.