

УДК 621.396

## КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ПИК-ФАКТОРА В СИСТЕМЕ РАВИС

*Le Van Ky, аспирант кафедры мультимедийных технологий и телекоммуникаций МФТИ,  
e-mail: levanky@phystech.edu;*

*Динь Тхи Хуен Чанг, аспирантка кафедры мультимедийных технологий и телекоммуникаций МФТИ,  
e-mail: chipchip\_347@mail.ru.*

## COMBINED METHODS FOR PAPR REDUCTION IN THE RAVIS SYSTEM

*Le Van Ky, Dinh Thi Huyen Trang*

*A well-known disadvantage of systems with OFDM modulation is a high Peak to Average Power Ratio (PAPR). Due to this feature OFDM radio signal contains a lot of short-term peaks, which requires the use of power amplifiers with a wide linear dynamic range. In this paper, we propose several combined methods of PAPR reduction in the digital terrestrial multimedia broadcasting system RAVIS.*

**Key words:** PAPR, tone reservation, active constellation extension, selected mapping, combined method.

**Ключевые слова:** пик-фактор, резервирование тона, активное расширение созвездия, селективное отображение, комбинированный метод.

**Введение**

Система цифрового радиовещания РАВИС (АудиоВизуальная Информационная Система Реального времени; международное название – RAVIS, Real-time AudioVisual Information System) представляет собой систему передачи для цифрового наземного узкополосного вещания в ОВЧ диапазоне частот (65,9-74,0 МГц и 87,5-108,0 МГц) с шириной полосы радиоканала от 100 до 250 кГц в первой версии системы (РАВИС 1.0) и до 1000 кГц во второй версии (РАВИС 2.0), которая позволяет осуществлять информационное стереофоническое звуковое и видеовещание [1-3].

Система РАВИС является эффективной транспортной средой для любых типов данных, которые мультиплексируются в форматы, включающие пакеты постоянной (например, транспортный поток MPEG-2) или переменной длины. Мультиплекс системы состоит из трех логических каналов: обязательного канала основного сервиса КОС (максимальный поток до 900 кбит/с при полосе сигнала 250 кГц в РАВИС 1.0) и двух опциональных каналов передачи дополнительной информации: низкоскоростного канала данных с повышенной надежностью передачи (НСК, пропускная способность около 12 кбит/с) и надежного канала передачи данных (НКД, пропускная способность около 5 кбит/с). Эти логические каналы могут использоваться, например, в системах оповещения о чрезвычайных ситуациях и т.д.

Как известно, сейчас в мире разработаны различные методы снижения пик-фактора, такие как:

- 1) методы, основанные на отсечении и фильтрации;
- 2) метод селективного отображения (англ. SLM – Selective Mapping) [4];

*Известный недостаток систем с OFDM модуляцией – высокое отношение пиковой мощности к средней ее величине (высокий пик-фактор). За счет этого свойства OFDM радиосигнал содержит множество кратковременных пиков, что требует использования в передающих средствах усилителей мощности с широким линейным динамическим диапазоном. В данной работе проанализировано несколько комбинированных методов снижения пик-фактора в системе цифрового наземного мультимедийного вещания.*

- 3) методы, основанные на кодировании;
- 4) метод частичной последовательности передачи (англ. PTS – Partial Transmit Sequences);
- 5) метод резервирования тона (англ. TR – Tone Reservation) [5];
- 6) метод нелинейного компандирования (Nonlinear Companding Transform) [6];
- 7) метод инъектирования тона (англ. TI – Tone Injection);
- 8) метод активного расширения созвездия (англ. ACE – Active Constellation Extension) и другие [7].

Сравнение качественных свойств различных методов снижения пик-фактора приведено в табл. 1 [8]. Под деградацией здесь подразумевается наличие искажений на информационных несущих вследствие применения метода снижения пик-фактора. Нельзя однозначно сказать, что какой-либо метод лучше других, поскольку в различных ситуациях (качество фильтров, линейность характеристики усилителя мощности, требования к надежности передачи, количество несущих и т.д.) наиболее эффективными могут оказаться разные методы.

Известно много факторов, которые следует рассмотреть перед выбором конкретного метода снижения PAPR. Эти факторы включают величину снижения PAPR, увеличение мощности передаваемого сигнала, увеличение доли битовых ошибок (bit error ratio, BER) на приемниках, потери скорости передачи данных, увеличение сложности вычислений и т.д. Далее мы кратко обсудим каждый пункт.

Таблица 1. Сравнение свойств различных методов снижения пик-фактора

Метод	Вычислительная сложность	Деградация сигнала	Снижение скорости передачи данных	Увеличение мощности сигнала
отсечения и фильтрации	низкая	да	нет	нет
селективного отображения	высокая	нет	да	нет
кодирования	высокая	нет	да	нет
частичной последовательности передачи	высокая	нет	да	нет
резервирования тона	средняя	нет	да	да
нелинейного компандирования	низкая	да	нет	нет
инжективного тона	средняя	да	нет	да
активного расширения созвездия	средняя	да	нет	да

### Сравнительный анализ методов снижения пик-фактора

Величина снижения PAPR: понятно, что это самый важный фактор в выборе метода снижения PAPR. Особое внимание должно быть уделено тому, что некоторые методы приводят к вредным эффектам. Например, метод отсечения амплитуды четко удаляет пики, но приводит к внутрисполосным и внеполосным искажениям, и после фильтрации внеполосных искажений PAPR снова увеличивается.

*Увеличение мощности передаваемого сигнала:* некоторые техники требуют увеличения мощности в сигнале передачи после использования методов снижения PAPR. Например, TR требует более мощного сигнала, потому что необходимо использовать некоторую мощность для корректирующих сигналов. TI использует набор эквивалентных точек созвездия вместо исходного созвездия, чтобы уменьшить PAPR. Поскольку все эквивалентные точки созвездия требуются больше мощности, чем исходная точка созвездия, мощность передаваемого сигнала должна быть нормализована обратно к исходному уровню мощности.

*Увеличение BER на приемнике:* это также важный фактор, тесно связанный с увеличением мощности передаваемого сигнала. Некоторые методы увеличивают BER на приемнике. Например, BER после применения ACE будет ухудшаться, если мощность сигнала передачи будет зафиксирована. В некоторых методах, таких как SLM и PTS, весь блок данных может быть потерян, если дополнительная информация получена с ошибкой. Это также увеличивает BER на приемнике.

*Потери скорости передачи данных:* некоторые методы требуют, чтобы скорость передачи данных была уменьшена. При использовании методов SLM и PTS скорость передачи данных снижается из-за вспомогательной информации, используемой для информирования приемника о том, что сделано в передатчике.

*Вычислительная сложность:* это еще один важный показатель при выборе методов снижения PAPR. Такие методы, как SLM и PTS, требуют большого количества операций, чтобы находить решение для снижения PAPR. Напротив, метод нелинейного компандирования требует небольшого количества вычислений. Как правило, более сложные методы имеют более высокую способность сокращения PAPR.

Методы, основанные на ограничении амплитуды и фильтрации, заключаются в итеративном ограничении амплитуды сигнала во временной области, переводе полученного сигнала в частотную область и фильтрации внеполосного излучения. После фильтрации внеполосного излучения пики сигнала увеличатся по амплитуде; кроме того, такой подход приводит к увеличению ошибок модуляции – снижению показателя MER (modulation error ratio). За счет применения сглаживающих окон можно снизить уровень внеполосного излучения. На практике такие методы редко используются в чистом виде, поскольку приводят к расширению полосы сигнала.

Метод селективного отображения и метод частичной последовательности передачи относятся к вероятностным методам снижения пик-фактора. Они не исключают полностью появление сигналов с большим пик-фактором, но существенно снижают вероятность их появления. Суть методов заключается в том, что из каждого OFDM-символа определенным образом формируется набор модифицированных OFDM-символов, для каждого из которых рассчитывается пик-фактор. В эфир излучается тот модифицированный OFDM-символ, который имеет наименьший пик-фактор, причем этот символ несет в себе дополнительную служебную информацию о том, каким образом можно восстановить из модифицированного символа исходный. Эти методы не приводят к появлению внеполосных излучений.

Методы, основанные на кодировании, заключаются в том, что, вводя относительно небольшую избыточность в передаваемое сообщение, все множество входных комбинаций кодера отображается во множество слов с пик-фактором, не превышающим заданный. Впрочем, также было показано, что практических решений, которые бы обеспечивали низкое значение пик-фактора сигнала OFDM с числом несущих порядка сотен и тысяч неизвестно. Таким образом, эти методы также неприменимы в современных вещательных системах.

Метод нелинейного компандирования заключается в том, что сигнал во временной области пропускается через функцию, которая увеличивает сигнал с маленькими мощностями и не изменяет сигнал с большими мощностями. В результате этого средняя мощность сигнала увеличивается, а максимальное его значение не изменяется, то есть PAPR уменьшается. Данный метод приводит к появлению внеполосных излучений. Это значит, что, как и метод отсечения и фильтрации, этот метод редко применяется на практике.

Наиболее широкое применение в системах цифрового эфирного вещания получили метод резервирования тона (применяется в системах ATSC 3.0, DVB-T2, RABIS 2.0) и активного расширения созвездия (описан в стандартах ATSC 3.0, DVB-T2, DTMB-A, применим во многих системах вещания). В данной главе приведены результаты моделирования различных алгоритмов снижения пик-фактора применительно к разрабатываемой в данное время второй версии стандарта системы RABIS. Это позволит сравнить эффективность различных методов на реальной системе эфирного вещания с широким диапазоном ширины полосы сигнала.

### Результаты моделирования

Проведенное моделирование метода резервирования тона показывает, что недостатком данного метода является малая эффективность для сигнала при узкой полосе (и, как следствие, малом числе резервированных несущих). Однако при широкой полосе сигнала данный метод позволяет эффективно снижать пик-фактор.

Суть модифицированного метода резервирования тона заключается в том, что, рационально выбирается уровень отсечения в соответствии со значением числа итераций алгоритма, несущих для реализации ядра, а также на основе использования циклического разностного множества с тем, чтобы получить квазиоптимальное ядро. Такой подход существенно улучшает эффективность классического метода при узкой полосе спектра OFDM сигнала.

Использование модифицированного варианта метода ACE (A-ACE) позволяет получить ряд преимуществ по сравнению со стандартным методом. Например, мощность сигнала после применения метода практически не увеличивается, не зависит от типов созвездия, вычислительная сложность уменьшается, увеличивается MER. Основной идеей алгоритма A-ACE является создание анти-пика сигнала для уменьшения PARP путем преобразования области отсечения в шумовую составляющую с возможной областью расширения сигнального созвездия и обеспечения удаления внеполосного искажения.

Рассмотрен метод селективных отображений. Результаты проведенного моделирования на сигнале системы RABIS показывают низкую эффективность данного алгоритма для сигнала с большим числом несущих, в то время как при узкой полосе данный метод позволяет эффективно снижать пик-фактор.

Можно утверждать следующее:

1. Когда количество несущих, выделенных для реализации ядра TR, мало (при малой полосе сигнала 100 кГц, 200 кГц), метод резервирования тона не дает хороших результатов.

2. Метод селективного отображения эффективнее при малой полосе сигнала, чем при широкой полосе (250 кГц – 1 МГц).

3. При широкой полосе сигнала, чтобы достичь хорошего результата, в методе резервирования тона требуется большое количество итерации.

4. Метод ACE лучше работает при широкой полосе сигнала.

5. Требования задачи снижения пик-фактора зависят от количества несущих, выделяемых для реализации ядра TR, возможности вычислительной техники и других параметров.

На этой основе автором [9, 10] предложено несколько подходов для комбинированных методов в задаче снижения пик-фактора в системе RABIS, для которых было проведено множество экспериментов по имитационному моделированию в среде MATLAB:

1. Если выделить только 2,5 % несущих для реализации алгоритма TR снижения пик-фактора и возможности вычислительной техники невысоки, следует применить метод селективного отображения при количестве вариантов выбора  $U = 64$  для полосы сигнала 100 кГц, а для других полос применить модифицированный метод резервирования тона. Результат моделирования данного подхода показан в табл. 2.

2. Если выделить только 2,5 % несущих для реализации алгоритма TR снижения пик-фактора и возможности вычислительной техники высоки, следует применить первый вариант комбинированного метода, т.е. сначала применить модифицированный метод резервирования тона для полос сигнала от 500 кГц до 1 МГц и метод селективного отображения ( $U = 64$ ) для полос 100-250 кГц, потом применить метод A-ACE (см. рис. 1). Результаты показаны в табл. 3.

3. Когда выделены 5 % резервных несущих и требуется сильно уменьшить пик-фактор, нужно применить второй вариант комбинированного метода, это значит сначала применить модифицированный метод резервирования тона, потом применить метод A-ACE. Результаты изображены в табл. 4.

4. Если выделить 5 % резервных несущих и возможности вычислительной техники невысоки, следует применить модифицированный метод резервирования тона при всех полосах сигнала.

Приведенные ниже значения пик-фактора сигнала приведены для вероятности появления  $10^{-4}$ .

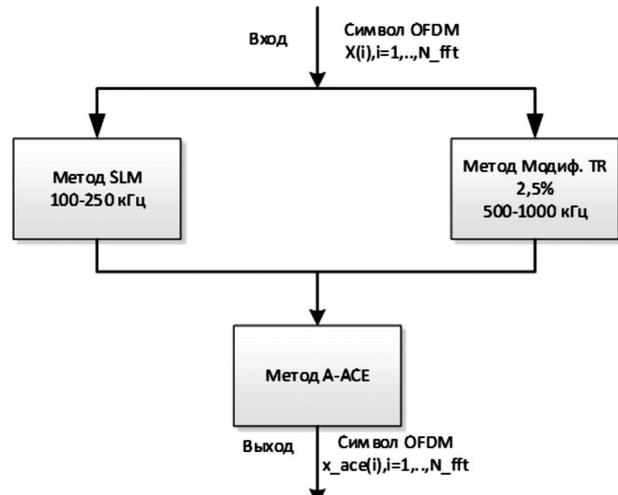


Рис. 1. Схема работы двухэтапного алгоритма, когда выделено только 2,5% резервных несущих для реализации алгоритмов снижения пик-фактора

Таблица 2. Пик-фактор после применения алгоритма SLM или модиф. TR

Ширина полосы		100 кГц	200 кГц	250 кГц	500 кГц	750 кГц	1 МГц
Исходный пик-фактор, дБ		<b>11,8</b>	<b>11,6</b>	<b>12,1</b>	<b>12,2</b>	<b>12,4</b>	<b>12,6</b>
Тип созвездия	Метод						
QPSK	Модиф. TR	7,8	7,8	7,7	7,8	7,6	7,6
	SLM/Модиф. TR	7,4	7,8	7,7	7,8	7,6	7,6
Доп. выигрыш		<b>0,4</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
QAM-16	Модиф. TR	8,0	7,9	8,1	7,9	7,9	7,6
	SLM/Модиф. TR	7,5	7,9	8,1	7,9	7,9	7,6
Доп. выигрыш		<b>0,5</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
QAM-64	Модиф. TR	8,0	7,9	8,0	7,7	7,8	7,6
	SLM/Модиф. TR	7,6	7,9	8,0	7,7	7,8	7,6
Доп. выигрыш		<b>0,4</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Таблица 3. Пик-фактор после применения алгоритма SLM/модиф. TR 2,5 % и A-ACE

Тип созвездия	Ширина полосы		100 кГц	200 кГц	250 кГц	500 кГц	750 кГц	1 МГц
	Исходный пик-фактор, дБ		<b>11,8</b>	<b>11,6</b>	<b>12,1</b>	<b>12,2</b>	<b>12,4</b>	<b>12,6</b>
	Метод							
QPSK	I этап	Модиф. TR	7,8	7,8	7,7	7,8	7,6	7,6
		SLM	7,4	7,9	8,2	8,6	8,7	8,8
	II этап	Модиф. TR/A-ACE	7,0	7,0	6,9	<b>6,8</b>	<b>6,7</b>	<b>6,6</b>
		SLM/A-ACE	<b>6,4</b>	<b>6,6</b>	<b>6,8</b>	6,9	7,0	6,9
QAM-16	I этап	Модиф. TR	8,0	7,9	8,1	7,9	7,9	7,6
		SLM	7,5	7,9	8,2	8,5	8,7	8,8
	II этап	Модиф. TR/A-ACE	7,3	7,2	7,2	<b>7,0</b>	<b>6,8</b>	<b>6,6</b>
		SLM/A-ACE	<b>6,7</b>	<b>6,9</b>	<b>7,0</b>	7,4	7,6	7,6
QAM-64	I этап	Модиф. TR	8,0	7,9	8,0	7,7	7,8	7,6
		SLM	7,6	7,9	8,3	8,5	8,7	8,7
	II этап	Модиф. TR/A-ACE	7,6	7,4	7,5	<b>7,0</b>	<b>7,1</b>	<b>6,8</b>

Таблица 4. Пик-фактор после применения алгоритма модиф. TR 5 % и A-ACE

Ширина полосы		100 кГц	200 кГц	250 кГц	500 кГц	750 кГц	1 МГц
Исходный пик-фактор, дБ		<b>11,7</b>	<b>11,8</b>	<b>11,9</b>	<b>12,1</b>	<b>12,3</b>	<b>12,5</b>
Тип созвездия	Метод						
QPSK	Модиф. TR	7,1	7,3	7,3	7,1	7,2	7,2
	A-ACE	<b>6,4</b>	<b>6,3</b>	<b>6,3</b>	<b>6,4</b>	<b>6,2</b>	<b>6,1</b>
QAM-16	Модиф. TR	7,2	7,3	7,3	7,1	7,3	7,3
	A-ACE	<b>6,4</b>	<b>6,4</b>	<b>6,5</b>	<b>6,4</b>	<b>6,4</b>	<b>6,3</b>
QAM-64	Модиф. TR	7,3	7,3	7,1	7,3	7,4	7,3
	A-ACE	<b>6,6</b>	<b>6,6</b>	<b>6,6</b>	<b>6,7</b>	<b>6,8</b>	<b>6,6</b>

В табл. 2 изображены результаты применения алгоритма снижения пик-фактора SLM для полосы сигнала 100 кГц и алгоритма модиф. TR для остальных полос сигнала системы РАВИС. Как сказано ранее, метод SLM при  $U = 64$  дает результат лучше других методов только при узкой полосе (100 кГц). Чтобы улучшить эффективность этой комбинации, следует либо увеличивать количество итераций метода TR, либо увеличивать число  $U$ . Но этот подход влечет необходимость увеличения вычислительной мощности системы, хотя не дает существенного улучшения.

Как видно из табл. 3, при полосе от 100 до 250 кГц комбинация методов SLM/A-ACE работает лучше, чем комбинация методов TR/A-ACE. Наоборот, при широкой полосе от 500 до 1000 кГц комбинация методов модиф. TR/A-ACE работает эффективнее, чем SLM/A-ACE. Этот результат легко объяснить следующим образом: при

узкой полосе метод селективного отображения работает эффективнее других методов.

В табл. 3 проявляется один нюанс: в диапазоне 200 и 250 кГц хотя на первом этапе метод модиф. TR дает результат лучше метода SLM, но комбинация модиф. TR/A-ACE дает результат хуже, чем SLM/A-ACE. Этот нюанс можно объяснить тем, что после применения метода модиф. TR структура сигнала изменена и вероятность появления пика мала. Иными словами, сигнал после модиф. TR более плоский. Наоборот, структура сигнала после применения SLM не изменена, хотя высокие пики малы, но маленьких пиков очень много.

В табл. 4 показано, что для созвездия QPSK реализация метода A-ACE после метода TR обеспечивает самый лучший результат. Также после применения методов TR и A-ACE при модуляции QAM-16 и QAM-64 формируется сигнал с малым пик-фактором.

## Заключение

На основании результатов моделирования методов снижения пик-фактора было сформулировано несколько вариантов применения методов снижения пик-фактора, предложенных авторами для системы РАВИС второго поколения, в том числе двухэтапный алгоритм. Двухэтапный метод подразумевает, что на первом этапе снижения пик-фактора к исходному символу должны применяться методы SLM с 64 отображениями (при ширине полосы сигнала 100-250 кГц) или модифицированный TR (при ширине полосы сигнала 500-1000 кГц). В отличие от метода активного расширения созвездия, такой подход позволит обеспечить низкий пик-фактор при любом виде модуляции. Использование SLM может быть не только более эффективным с точки зрения обеспечения низкого пик-фактора, но и с точки зрения экономии частотного ресурса, что особенно ценно в условиях узкого канала. На втором этапе предлагается использовать модифицированный метод активного расширения созвездия.

Кроме того, в зависимости от возможностей вычислительной техники, авторами предлагается еще несколько вариантов снижения пик-фактора. Например, двухвариантный метод, под которым понимается применение метода селективного отображения  $U = 64$  для полос сигнала 100 и 200 кГц, а для других полос – применение модифицированного метода резервирования тона.

Кроме того, при 2,5 % резервных несущих целесообразнее пользоваться предложенным двухэтапным методом снижения пик-фактора; если же требования к пропускной способности канала допускают использование 5 % несущих, тогда достаточно применить только модифицированный метод резервирования тона и можно отказаться от метода селективных отображений или использовать двухэтапный метод (сначала метод резервирования тона, потом метод активного расширения созвездия).

## Литература

1. Дворкович А.В., Дворкович В.П., Зубарев Ю.Б., Соколов А.Ю., Чернов Ю.А. Способ трансляции информационного телевидения // Патент РФ № 2219676, 08.11.2000.
2. Дворкович В.П., Дворкович А.В., Иртюга В.А., Тензина В.В. Новая аудиовизуальная информационная система // Broadcasting. Телевидение и радиовещание. – 2005. – № 5. – С. 52-56.
3. Дворкович А.В., Дворкович В.П., Иртюга В.А., Митягин К.С. Стандарт цифрового мультимедийного вещания РАВИС 2.0 // Цифровая обработка сигналов и ее применение.: Докл. 19 Междун. конф. (DSPA-2017, Москва, 29-31 марта 2017 г.). – М.: 2017. – Выпуск XIX-1. – С. 222-225.
4. Bauml R.W., Fischer R.F.H. and Huber J.B. Reducing the Peak-to-Average Power Ratio of Multicarrier Modulation by Selected Mapping // Electronics Letters, Vol. 32, No. 22, 1996, pp. 2056-2057.
5. Tellado J. Peak to average power reduction for multicarrier modulation Ph.D. dissertation, Stanford Univ., Stanford, CA, Sep. 1999.
6. Huang X., Lu J., Zheng J., Chuang J., and Gu J. Reduction of peak-to-average power ratio of OFDM signals with companding transform // IEE Elec. Lett., vol. 37, Apr. 2001, pp. 506-507.
7. Krongold B.S. and Jones D.L. PAR reduction in OFDM via active constellation extension // IEEE Trans. Broadcast., vol. 49, no. 3, Sep. 2003, pp. 258-268.
8. Han S.H., Lee J.H. An Overview of Peak-to-Average Power Ratio Reduction Techniques for Multicarrier Transmission // IEEE Wireless Communication, April 2005, pp 56-65.
9. Ле Ван Ки. Исследование алгоритмов обработки сигналов с OFDM модуляцией и разработка рекомендации по уменьшению ПИК-фактора // Цифровая обработка сигналов. 2016. №1. С. 29-33.
10. Ле Ван Ки. Реализация системы кодирования с уменьшением пик-фактора OFDM сигналов // Цифровая обработка сигналов. 2017. №4. С. 67-68.

## *Уважаемые коллеги!*

Для тех, кто не успел оформить подписку на первое полугодие 2019 года через АО «Роспечать», сохраняется возможность приобретения журналов непосредственно в редакции по адресу: г. Москва, ул. Авиамоторная, дом 8, Научный Центр МТУСИ, ком. 612. Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, метро «Авиамоторная», или оформить Заказ в соответствии с требованиями, выставленными на сайте журнала: [www.dsps.ru](http://www.dsps.ru).

Справки по телефону: (+7 903) 201-53-33 (Самсонов Геннадий Андреевич).

E-mail: [rntores@mail.ru](mailto:rntores@mail.ru)