

# **Наземное цифровое телевизионное вещание (DVB-T) – удивительные возможности системы с частотным уплотнением ортогональных несущих и кодированием (COFDM)**

**Жерард Фариа, директор по науке**

**ИТИС, Франция**

## **КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ**

Из пяти систем наземного цифрового вещания, стандартизованных за последние пять лет (т.е. DAB-T – система наземного цифрового радиовещания, DVB-T – система наземного цифрового телевидения, ISDB-T – система наземного цифрового вещания международного стандарта, ATSC-8VSB – новая система наземного телевидения с 8-позиционной модуляцией и частично подавленной боковой полосой, а также грядущая система DRM – система с **модуляцией динамического диапазона**, четыре основаны на варианте COFDM, в котором используется система с частотным уплотнением ортогональных несущих с кодированием.

Европейский стандарт DVB-T включает в себя большое количество режимов передачи и предоставляет способ приспособить сигнал COFDM для использования во многих системах наземного вещания. Одна из таких систем – система с иерархической модуляцией – позволяет организовать один радиочастотный канал, состоящий из двух виртуальных каналов, каждый из которых несет свой собственный защищенный транспортный поток (MPEG-TS). Кроме того, как и во всех COFDM системах, несколько передатчиков сети вещания могут работать на одном и том же радиочастотном канале, т.е. образовывать одночастотную сеть вещания (SFN) для определенной зоны вещания.

Целью настоящей презентации является обратить внимание на то, каким образом эти две особенности цифрового наземного телевидения (DVB-T) предоставляют огромные возможности этой системе по внедрению услуг цифрового телевидения в существующем частотном спектре, который в настоящее время уже «переполнен» традиционным аналоговым вещанием.

Наряду с пояснениями сущности системы DVB-T COFDM, приводятся несколько примеров детального анализа работы одночастотной сети вещания и иерархической модуляции, а также комментарии по поводу технических компромиссов, предлагаемых предприятиям вещания.

Почему столько много стран остановили свой выбор на системах COFDM? Автор намерен акцентировать замечательные особенности системы COFDM, которые и послужили основой такого выбора.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Многие страны, как например, Австралия, Сингапур и Индия, остановили свой выбор на технологии COFDM при внедрении системы цифрового радио- и телевидения.

В контексте цифрового телевидения, Европейский стандарт на цифровое наземное телевизионное вещание (DVB-T) [1] определил систему, пригодную для широкого круга приложений в области вещания.

Такая универсальность объясняется возможностью выбора параметров модуляции, что позволяет использовать до 120 режимов модуляции и до 1200 их иерархических типов.

Поскольку система COFDM была разработана с целью преодоления проблем распространения наземных радиоканалов, она, в том числе, устраняет эффект эхо, вызванного или условиями распространения радиоволн или работой нескольких передатчиков, работающих на одном радиочастотном канале. В настоящей статье рассматриваются возможности, которые способна предоставлять система COFDM, основные понятия системы COFDM, а также делается акцент на отличительные особенности работы одночастотной сети вещания (SFN) и иерархической модуляции.

## **ИЕРАРХИЧЕСКАЯ МОДУЛЯЦИЯ СИСТЕМЫ COFDM: ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ**

В начале 60-х годов в лаборатории компании Бэлл (США) была открыта технология шумоподобного спектра, поначалу использовавшаяся в военной области.

В начале 80-х годов во французской исследовательской лаборатории CCETT - Centre Commun d'Etudes en Télédiffusion et Télécommunication (1) - было проведено изучение способов применения этой технологии в области вещания. Было определена система, достаточно устойчивая и эффективная при передаче информации в цифровом виде: частотное уплотнение ортогональных несущих с кодированием (COFDM). Работы, проведенные в этой лаборатории, послужили в настоящее время основой двух основных стандартов для вещания: система цифрового радиовещания DAB [2] и система наземного цифрового телевизионного вещания DVB-T [1].

### **COFDM: ЧТО ЭТО ОЗНАЧАЕТ?**

Основная идея системы COFDM заключается в устранении ухудшения качества сигнала при наземном распространении радиоволн. Частотная характеристика канала неодинакова для его различных составляющих: при суммировании принимаемых несущих частот (основная несущая и ее эхо-сигналы) результирующий сигнал может быть равным нулю или превышать уровень основной несущей.

Для решения этой проблемы система COFDM сначала была использована для передачи данных в расширенном спектре с использованием большого набора близко расположенных частотных полос. Затем полезный сигнал перед его передачей был кодирован, чтобы обеспечить возможность его восстановления при приеме.

Теперь становится понятным применение слов «с кодированием» и «частотное уплотнение» в использованном здесь сокращении «COFDM»

### **COFDM: ПРИНЦИП ОРГАНИЗАЦИИ КАНАЛА**

#### **Расщепление канала**

Характеристики канала передачи, к сожалению, не остаются постоянными во времени, но в течение короткого промежутка времени эти характеристики для наземного канала можно считать постоянными.

Используя эту особенность, в системе COFDM имеется возможность применить расщепление наземного канала передачи во времени и по частоте (см. Рис. 1). В результате, радиочастотный канал организуется в виде набора узких частотных полос и в виде коротких во времени смежных «временных сегментов».

#### **Ввод поднесущих**

Каждая частотно-временная ячейка имеет свою собственную поднесущую (см. Рис. 2). Набор поднесущих в определенном временном сегменте называется символом OFDM. Для устранения взаимных помех между поднесущими, расстояние (промежуток) между ними выбирается равным обратной величине длительности символа: в этом случае поднесущие являются ортогональными.

#### **Ввод защитного интервала**

Поскольку эхо-сигналы представляют собой задержанные во времени копии основного сигнала, начало данного символа OFDM подвергается «загрязнению» задержанным окончанием предыдущего (взаимные помехи между символами). Для устранения этого эффекта между двумя соседними символами OFDM вводится защитный интервал (см. Рис. 3).

Во время интервала приемные устройства игнорируют поступающий сигнал, что приводит к снижению пропускной способности канала передачи.

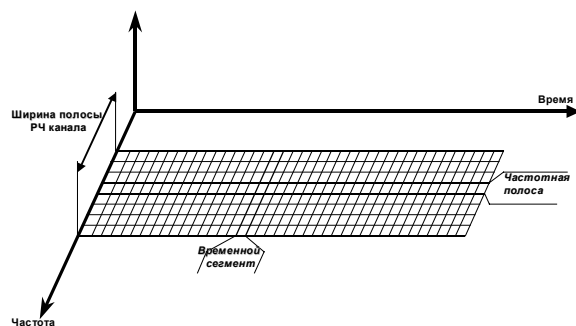
#### **Синхронизация каналов**

Чтобы осуществить надлежащим образом демодуляцию сигнала, приемные устройства должны произвести его выборку во время полезного периода символа OFDM (но не во время защитного интервала). Но тогда необходимо ввести временное окно по отношению к моменту, когда передается в эфир каждый символ OFDM.

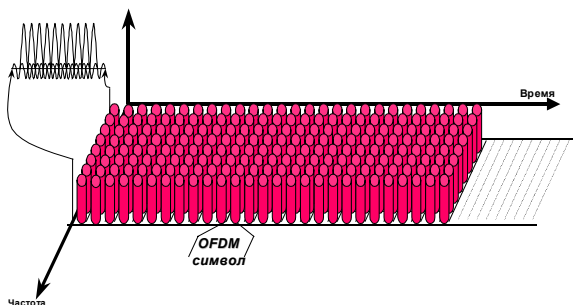
В системе DVB-T используются «пилотные» поднесущие, равномерно распределенные в канале передачи в виде маркеров синхронизации (см. Рис. 4).

---

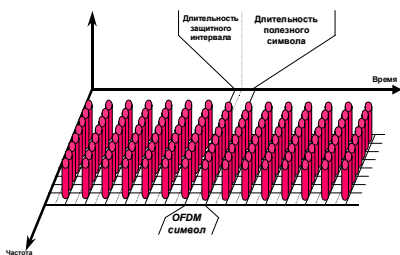
1 CCETT является научно-исследовательским центром группы Франс Телеком.



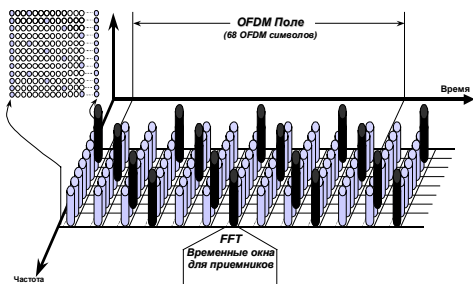
**Рис. 1: Расщепление канала**



**Рис. 2: Ввод поднесущих частот**



**Рис. 3: Ввод защитного интервала**



**Рис. 4: Маркеры синхронизации**

Вышеупомянутые особенности (расщепление канала, кодирование данных, ввод защитного интервала и маркеров синхронизации) составляют основные параметры модуляции COFDM.

К сожалению, все эти особенности предполагают потерю полезной информации канала или снижение реальной пропускной способности канала. И наоборот, они позволяют снизить степень ухудшения параметров сигнала из-за условий прохождения радиоволн за счет компромисса между устойчивостью канала и пропускной способностью канала.

С целью предоставления предприятиям вещания максимальной свободы при адаптации средств передачи по наземным каналам в соответствии с конкретными условиями, стандарт DVB-T определил допустимый диапазон этих параметров: их комбинация представляет собой режимы системы DVB-T.

## COFDM: КАКИМ ОБРАЗОМ ПРОИСХОДИТ ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ?

Для дальнейшего улучшения параметров сигнала системы COFDM необходимо смягчить побочные эффекты, возникающие при использовании защитного кодирования. В общем случае, это кодирование не способно скорректировать длинную последовательность (пакет) ошибочных битов.

При замираниях на соседних частотных полосах, смежные биты данных распределяются по удаленным поднесущим в пределах каждого символа OFDM. Такая особенность известна как частотное перемежение и проиллюстрировано на Рис. 5.

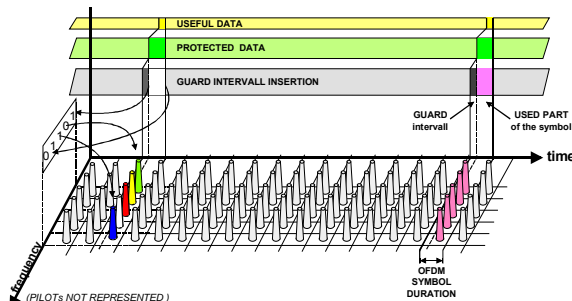


Рис. 5: Распределение данных по символам OFDM

Сначала производится кодирование данных в цифровой форме с помощью защитных кодов. Затем вводится защитный интервал (путем ввода избыточных битов данных) между пакетами защищенных данных. В заключение с помощью алгоритма частотного перемежения, синхронизированного с кадром передачи, осуществляется распределение пакета данных по близко расположенным поднесущим.

### Основная группа

Распределение данных по символам OFDM означает индивидуальную модуляцию каждой поднесущей в соответствии с одной из трех основных комплексных групп DVB-T. Эти группы показаны на Рис. 6.

В зависимости от выбранной группы, каждая поднесущая переносит одновременно 2 бита (модуляция 4QAM), 4 бита (модуляция 16QAM) или 6 бит (модуляция 64QAM). Каждой группе свойственна своя помехозащищенность с учетом минимально допустимого отношения сигнал/шум для приемлемого качества демодуляции. Грубо говоря, модуляция 4QAM допускает от 4 до 5 раз больший уровень шума, чем модуляция 64QAM.

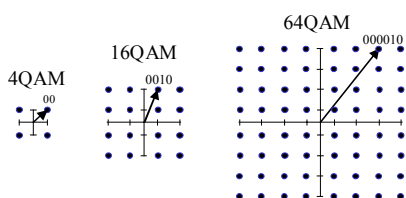


Рис. 6: Основная группа DVB-T

## COFDM: РАБОТА ОДНОЧАСТОТНОЙ СЕТИ

Существует много достоинств современной цифровой модуляции COFDM, но основным является успешная борьба с эхо-сигналами, которые могут возникать из-за отражений от окружающих предметов или при работе нескольких передатчиков на одном и том же радиочастотном канале.

В системе вещания COFDM к естественным эхо-сигналам, вызванным отражениями или рефракцией, добавляются активные эхо-сигналы, генерируемые передатчиками на совмещенном канале, или ретрансляторами. Собственно говоря, система COFDM способна использовать с выгодой некоторые виды эхо-сигналов (т.е. те, которые усиливают приемный сигнал) и игнорировать эхо-сигналы, которые сказываются отрицательно на полезном сигнале.

Соответственно, модуляция COFDM предоставляет вещательным организациям новый способ эксплуатировать свои наземные сети: увеличивать количество источников сигналов с совмещенными каналами для расширения зоны охвата вещанием.

При этом появляется возможность более эффективного использования нескольких маломощных передатчиков или ретрансляторов вместо одного мощного передатчика, при котором невозможно избежать отдельных зон неуверенного приема в общей зоне обслуживания.

## КАК РАБОТАЕТ ОДНОЧАСТОТНАЯ СЕТЬ?

Одночастотная сеть образуется, когда несколько передатчиков работают в реальной обстановке как передатчики совмещенных каналов, т.е. они излучают в эфир в любой момент времени идентичный сигнал в каждую точку зоны охвата вещанием.

«Золотое правило» одночастотной сети, таким образом, включает следующее:

Каждый передатчик одночастотной сети должен излучать:

- На одной и той же частоте,
- В один и тот же момент времени,
- Одинаковые биты данных.

Эти положения «золотого правила» представляют собой также и основные ограничения одночастотной сети, оказывающие непосредственное влияние на организацию сети передачи: необходимо осуществлять синхронизацию каждого передатчика одночастотной сети и во времени и по частоте.

## ОГРАНИЧЕНИЯ ПО ЧАСТОТЕ

Как и в случае сетей с обычным частотным планом, рабочая частота каждого передатчика одночастотной сети должна поддерживаться с высокой точностью и точно контролироваться. Но в случае одночастотной сети системы COFDM стабильность и точность рабочей частоты должны быть такими, чтобы каждая излучаемая поднесущая занимала свое абсолютное положение независимо от используемой частоты радиоканала.

На практике для синхронизации работы одночастотных сетей используется всемирная опорная частота приемников GPS – см. Рис. 7.

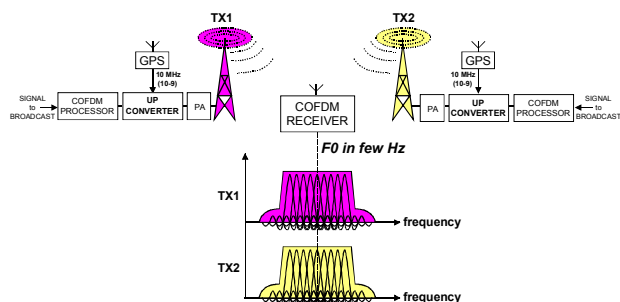


Рис. 7: Синхронизация по частоте

## ВРЕМЕННЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ОДНОЧАСТОТНОЙ СЕТИ

Выбор величины защитного интервала для одночастотной сети оказывает решающее влияние на топологию этой сети: поскольку длительность этого интервала определяет допустимую для данной сети величину задержки эхо-сигнала, то она и определяет максимальное расстояние между передатчиками, работающими на совмещенных каналах.

Временное ограничение представляет еще одну проблему для вещателей: все передатчики должны излучать в каждый момент времени одинаковый OFDM символ, а для этого необходима временная синхронизация.

Такая синхронизация ограничивает эхо-сигналы (естественные или генерируемые передатчиками на совмещенных каналах) величиной защитного интервала (см. Рис. 8).

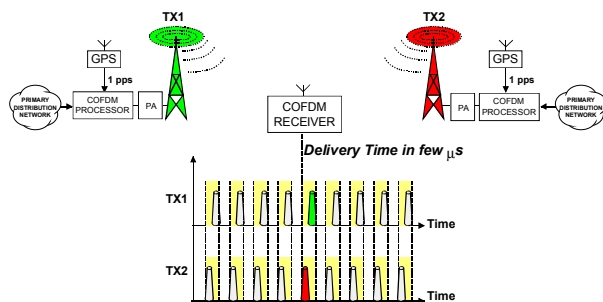


Рис. 8: Временная синхронизация

Временное окно, в течение которого приемники будут осуществлять выборку принимаемого сигнала, позволит исключить защитный интервал, в течение которого приемный сигнал состоит из комбинации двух последовательных символов COFDM.

Таким образом, к защитному интервалу следует относиться в общем случае как к «временному резерву»: его необходимо использовать при работе в эфире, а не для компенсации погрешностей синхронизации передатчиков одночастотной сети.

На практике оператор сети использует один импульс в секунду (1 PPS), генерируемый приемником GPS. Этот опорный импульс вводит временную метку в частотном уплотнении, в самом начале работы первичной сети с тем, чтобы в каждом передатчике процессор системы COFDM осуществил задержку предстоящего частотного уплотнения до прихода опорного импульса

## ОДНОЧАСТОТНАЯ СЕТЬ: ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Принцип COFDM в одночастотных сетях применялся во многих странах путем использования систем цифрового радиовещания (DAB) или наземного цифрового телевизионного вещания (DVB-T). В настоящее время эти системы используются в Англии, Швеции, Испании и Франции для оптимизации зоны охвата вещанием и для работы сети вещания в виде радиочастотных ячеек. Работа одночастотной сети в режиме COFDM представляет отнюдь не лабораторный интерес: этот режим - испытанный и эффективный способ эксплуатации сети вещания в реальных условиях.

## COFDM: ИЕРАРХИЧЕСКАЯ МОДУЛЯЦИЯ

Другой интересной особенностью, применяемой в стандарте DVB-T, является возможность применения принципа иерархической модуляции. Вернемся к моменту, когда данные распределяются по поднесущим COFDM.

### Иерархическая модуляция

Иерархическая модуляция представляет собой альтернативную интерпретацию (и использование) обычных типов модуляции 16QAM и 64QAM (созвездия). Как показано на Рис. 9, иерархическое созвездие 16QAM получается смещением двух 4QAM. По аналогии, иерархическое созвездие 64QAM получается смещением двух 16QAM.

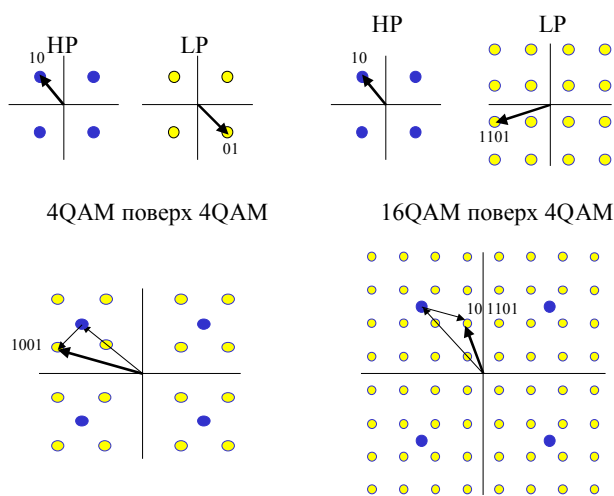


Рис. 9: Векторное представление иерархического созвездия DVB-T

(HP = высший приоритет; LP = низший приоритет)

Иерархическая модуляция может рассматриваться как средство разделения радиочастотного канала на два виртуальных, причем каждый из них обладает своей собственной скоростью передачи, помехоустойчивостью, и, соответственно, несколькими различными зонами охвата.

Характеристики этих двух виртуальных каналов определяются соответственно различными комбинациями векторных точек на звездной диаграмме и различными скоростями кодирования.

На практике это означает, что первый поток данных формируется с использованием созвездия 4QAM. Каждая пара битов этого потока данных определяет квадрант, занимаемый поднесущей данного созвездия. Второй же поток данных используется для преобразования внутри данного квадранта, т.е. вещественной и мнимой компонент поднесущей.

Если второй поток данных формируется парами битов, иерархическое созвездие именуется как «4QAM поверх 4QAM». Результирующее созвездие будет типа 16QAM. Если вместо этого

используются четыре бита, то созвездие именуется как “16QAM поверх 4QAM”, а результирующее созвездие будет типа 64QAM.

В первом потоке данных всегда используется модуляция 4QAM, а поскольку этой модуляции присуща естественная высокая помехоустойчивость, то такой поток назван потоком высшего приоритета (HP). Второй поток, модулирующий первый, менее помехоустойчивый (это случай 4QAM или 16QAM), назван потоком низшего приоритета (LP).

В режимах иерархической передачи предоставляется возможность использования еще одной особенности – альфа-фактора, который обеспечивает сдвиг для каждой четверти созвездия в пределах данного квадранта.

В итоге, такой сдвиг делает модуляцию HP-4QAM более помехоустойчивой, но, по сравнению с модуляцией низшего приоритета, более уязвимой.

### **ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИИ**

Иерархической модуляции системы DVB-T присущи две основные особенности:

- Предоставляется возможность вещания на одном радиочастотном канале двумя независимыми транспортными потоками данных формата MPEG,
- Каждому транспортному потоку присуща своя помехозащищенность и своя зона охвата.

Очевидно, что различие в помехоустойчивости между потоками высшего и низшего приоритета зависит и от применяемых типов модуляции (4QAM или 16QAM) и от скорости кодирования.

Поток высшего приоритета (HP) всегда модулированный как 4QAM, будет обладать максимальной полезной скоростью передачи, определяемой только скоростью защитного кодирования.

Сопутствующий поток низшего приоритета, который модулирует поток высшего приоритета, воспринимается приемником как дополнительный шум в квадранте принимаемого потока высшего приоритета. Таким образом, качество потока высшего приоритета страдает с точки зрения допустимого отношения сигнал/шум, по сравнению с обычной модуляцией 4QAM.

Существуют два способа компенсации или смягчения эффекта ухудшения отношения сигнал/шум потока высшего приоритета:

- Если необходимо сохранить полезную скорость передачи потока высшего приоритета, например, путем увеличения альфа-фактора, то снижение качества потока высшего приоритета может быть квазиустраненным,
- Если допускается некоторое снижение полезной скорости передачи потока высшего приоритета, то снижение качества этого потока может быть смягчено путем увеличения степени его защиты.

Выбор между этими двумя методами будет зависеть от приемлемого для вещателя снижения качества потока низшего приоритета (при этом должен применяться только один из методов).

Что касается потока низшего приоритета, то его скорость передачи непосредственно определяется используемой комбинацией тип модуляции / скорость кодирования. Эта зависимость строго пропорциональна в случае режимов модуляций 4QAM и 16QAM.

Но при модуляции потоком низшего приоритета 4QAM или 16QAM потока высшего приоритета 4QAM, отношение сигнал/шум, необходимое для демодуляции потока низшего приоритета, приобретает еще более важное значение, чем в случае режимов неиерархической передачи 4QAM и 16QAM. Отношение сигнал/шум, необходимое для потока низшего приоритета, собственно говоря, сравнимо с отношением, которое требуется для всего стандартного созвездия.

### **ИЕРАРХИЧЕСКАЯ МОДУЛЯЦИЯ: ПРИЧИНЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

Во многих странах введение цифрового телевидения осуществляется путем совместного использования МВ/ДМВ диапазонов с существующим аналоговым телевидением, зачастую с использованием запрещенных каналов.

Как правило, частотное планирование сети осуществляется с учетом оптимальной скорости передачи на DVB-T канале, и кроме того, разработчики сети выбирают схему модуляции высокой плотности, минимизируют скорость кодирования (за счет мощности передатчика) и максимально сокращают защитный интервал в соответствии с географическими особенностями расположения передатчика (т.е. с учетом городских или сельских условий).



В итоге, часто останавливаются на типе модуляции 64QAM и скорости защитного кодирования 2/3, что позволяет реализовать скорость передачи 24 Мбит/с на канале шириной 8 МГц. Дальнейший выбор определяется ограничениями в топологии сети и зоны охвата:

- выбор 2K/8K определяется рабочим режимом модуляции в сети (многочастотной или одночастотной) и максимальным размером ячеек передачи,
- выбор защитного интервала определяется типом зоны охвата (городская или сельская), поскольку от этого зависит величина задержки эхо-сигнала.

Кроме того, особенность иерархической модуляции позволяет осуществить еще более детальное планирование.

На практике при использовании иерархических типов модуляции приходится выбирать между двумя крайностями, иллюстрированными на Рис. 10.



**Рис. 10: Схемы зон охвата**

(REG – обычная модуляция; LP – поток низшего приоритета; HP – поток высшего приоритета)

Во время первоначальных экспериментов с DVB-T иерархическая модуляция рассматривалась как средство формирования двух зон охвата данным передатчиком. Соответственно, эта особенность не считалась важной.

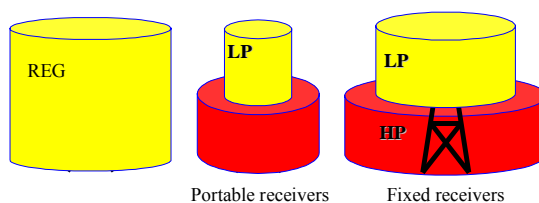
Но если целью является введение двух категорий услуг в спектре, уже заполненном традиционными аналоговыми системами, то иерархическая модуляция существенно поможет в достижении этой цели.

Короче говоря, предоставляемая иерархической модуляцией гибкость может быть оптимизирована различными путями, которые в значительной степени определяются точкой зрения вещателя или его проблемами. Ниже приводятся несколько примеров.

### ВЕЩАНИЕ НА ФИКСИРОВАННЫЕ И ПЕРЕНОСНЫЕ ПРИЕМНИКИ

Одним из первых применений иерархической модуляции является незначительное изменение параметров модуляции для обеспечения возможности приема сигналов в помещениях на переносные приемники.

Для фиксированных приемников используется высокий коэффициент усиления наружных антенн, устанавливаемых на крыше, а качество приема на переносные приемники страдает от затухания, вносимого стенами помещений.



**Рис. 11: Сравнение вариантов передачи для фиксированных и переносных приемников**

(REG – обычная модуляция; LP – поток низшего приоритета; HP – поток высшего приоритета, Portable receivers – переносные приемники, Fixed receivers – фиксированные приемники)

Как видно из Рис. 11, в сравнении с обычной модуляцией использование потоков высшего и низшего приоритетов позволяет создать две различные зоны охвата, а именно:

Фиксированные и переносные приемники смогут принимать более помехозащищенный (HP) поток данных, содержащих «основные» программы. Что же касается переносных приемников, то зона охвата потока высшего приоритета будет немного большей, чем в случае применения обычных типов модуляции.

В случае фиксированных приемников, зона охвата потока низшего приоритета ухудшается незначительно.

В чем же состоит компромисс при переходе от обычного режима модуляции 64QAM 2/3 к иерархической модуляции HP: 4QAM 1/2 и LP: 16QAM 2/3?



Скорость передачи	Обычная: 24,13 Мбит/с	НР: 6,03 Мбит/с LP: 16,09 Мбит/с
Сигнал/шум	Обычная: 16,5 дБ	НР: 8,9 дБ LP: 16,9 дБ
Гауссов канал		

**Таблица 1:** Сравнение качественных показателей приема фиксированными и переносными приемниками

Если говорить о скорости цифрового потока, то она уменьшается с 24,13 Мбит/с для обычного режима модуляции до 22,12 Мбит/с при иерархической модуляции. Таким образом, общая скорость цифрового потока сокращается на 2,01 Мбит/с.

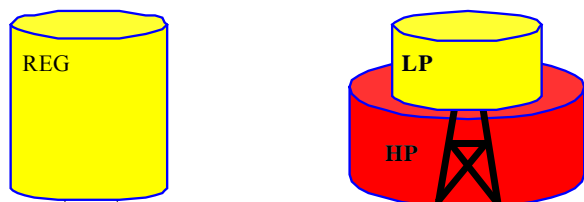
Что же касается отношения сигнал/шум, для гауссова канала, то устойчивость потока высшего приоритета (НР) намного выше (из-за перехода от 64QAM к 4QAM!), в то время как устойчивость потока низшего приоритета (LP) идентична устойчивости при обычном режиме модуляции (иерархическая 16QAM имеет такую же устойчивость, как и исходная обычная 64QAM).

В общем случае, общая скорость передачи снижается в меньшей степени, чем степень выигрыша в устойчивости для потока высшего приоритета, в то время как устойчивость потока низшего приоритета (т.е. зона охвата вещанием) остается почти неизменной.

В этом заключается интересный момент в отношении выигрыша для менее качественных переносных приемников, что и было продемонстрировано в Англии при полевых испытаниях, проведенных научно-исследовательским отделом корпорации БиБиСи [3].

### УВЕЛИЧЕНИЕ КАНАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ В СЕТИ

В этой связи, вещатель должен согласиться с тем, что при иерархической модуляции изменяется общая зона охвата по сравнению с режимом обычной модуляции (см. Рис. 12).



**Рис. 12: Иерархическая модуляция приводит к увеличению скорости передачи**

(REG – обычная модуляция; LP – поток низшего приоритета; НР – поток высшего приоритета)

Соответственно, вместо обычной модуляции 64QAM 2/3 используется иерархическая НР: 4QAM 3/4 и LP: 16QAM 3/4.

Снижение помехозащищенности потока высшего приоритета оправдывается естественной устойчивостью при переходе от обычной 64QAM к режиму иерархической модуляции.

Каково будет снижение отношения сигнал/шум в гауссовом канале?

Скорость передачи	Обычная: 24,13 Мбит/с	НР: 9,05 Мбит/с LP: 18,10 Мбит/с
Сигнал/шум	Обычная: 16,5 дБ	НР: 13,7 дБ LP: 18,6 дБ
Гауссовый канал		

**Таблица 2:** Цена увеличения скорости передачи

Отношение сигнал/шум потока высшего приоритета немного повышается (+2,8 дБ), а потока низшего приоритета слегка понижается (-2,1 дБ) по сравнению со стандартными значениями. С другой стороны, зона охвата становится незначительно меньше для потока низшего приоритета и больше для потока высшего приоритета по сравнению с обычным режимом модуляции.

Но при этом скорость передачи повышается на существенную величину 3,03 Мбит/с с 24,13 Мбит/с до 27,15 Мбит/с.

В общем случае, за счет искажения зоны охвата (снижение на 5 дБ между потоками высшего и низшего приоритета) и большей чувствительности потока низшего приоритета к интерференционным помехам совмещенного канала полезная емкость канала увеличивается на несколько Мбит/с!

### ВЕЩАНИЕ НА МОБИЛЬНЫЕ ПРИЕМНИКИ

Различные полевые и лабораторные испытания, проведенные к настоящему времени в рамках Европейского научно-исследовательского проекта MOTIVATE, показали, что прием в мобильных условиях сигнала DVB-T реален при использовании устойчивых режимов DVB-T.

Режимы 16QAM и 4QAM будут востребованы, если будут использованы в сочетании с сильной кодовой защитой. Поскольку мобильный вариант в общем случае планируется к использованию в городских условиях (например, общественный транспорт), то каналу будут присущи эхо-сигналы с небольшой задержкой.

С учетом вышесказанного, режимы DVB-T с высокими скоростями кодирования, коротким защитным интервалом, а следовательно, способными переносить потоки данных со скоростями от 8 до 12 Мбит/с (2 – 3 программы), могут найти применение для вещания на мобильные приемники.

Тем не менее, существует еще одна проблема, которую предстоит решить: как внедрить услуги для мобильных пользователей одновременно с услугами цифрового телевидения, предназначенными для фиксированных и переносных приемников в спектре частот, уже заполненного аналоговым телевидением?

Если будут доступны два радиочастотных канала, то первичный анализ покажет, что один из них следует передать мобильным пользователям (примерно 2 программы), а другой – традиционному приему (в Европе примерно 5 – 6 программ). Дальнейший анализ с учетом режима иерархической модуляции, возможно приведет к другим результатам.

Выберем режим иерархической модуляции с защитным интервалом 1/16 и HP: 4QAM 1/2, LP: 16QAM 3/4. Скорость передачи обоих виртуальных каналов будет составлять HP: 5,85 Мбит/с и LP: 17,56 Мбит/с.

Для мобильных приемников	PK 1 ~ 12 Мбит/с	~ 2 программы
Для фикс. приемников	PK 2 ~ 24 Мбит/с	~ 6 программ
Для мобильных приемников	HP 1: 5,85 Мбит/с	~ 1 программа
Для фикс. приемников	LP 1: 17,56 Мбит/с	~ 4 программы
Для мобильных приемников	HP 2: 5,85 Мбит /с	~ 1 программа
Для фикс. приемников	LP 2: 17,56 Мбит/с	~ 4 программы

**Таблица 3:** Сравнение качественных показателей приема фиксированных и переносных приемников

При таких настройках каждый радиочастотный канал будет обладать емкостью для одной хорошо защищенной программы (например, для мобильных пользователей в потоке высшего приоритета) и примерно четырех программ для фиксированных пользователей в потоке низшего приоритета.

При наличии двух радиочастотных каналов и использовании иерархической модуляции вещательная емкость будет составлять две программы для мобильных и восемь программ для фиксированных приемников.

Таким образом, совершенно очевидны следующие выводы:

- если радиочастотные каналы предназначены для конкретного использования, то возможна работа максимум 8 программ (2 для мобильных и 6 для фиксированных приемников),

- если вместо этого применяется иерархическая модуляция, когда формируются два виртуальных канала внутри каждого радиочастотного канала, то передаваться могут максимум 10 программ (2 x (1 подвижная + 4 фиксированных)).

Необходимо еще раз подчеркнуть, что иерархическая модуляция предоставляет существенные преимущества в части эффективности использования радиочастотного спектра.

#### **ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ТЕЛЕВЕЩАНИЕ ФОРМАТОВ ВЫСОКОЙ И СТАНДАРТНОЙ ТОЧНОСТИ**

Многие неевропейские страны, в том числе Австралия, планируют ввести телевизионные программы высокой точности с целью поддержки внедрения цифрового телевидения. Эти намерения имеют под собой основания в том, что в настоящее время на рынке уже предлагаются телевизоры формата высокой точности по приемлемой цене, а на развертывание услуг цифрового телевидения и завоевание рынка потребуется определенное время.

Тем не менее, в ходе внедрения услуг цифрового телевидения не все телевизионные приемники будут оснащены функциями формата высокой точности. Чтобы ускорить освобождение аналоговых каналов, будет необходимо осуществлять передачу форматов высокой и стандартной точности параллельно.

Иерархическая передача с использованием режима с защитным интервалом 1/16 HP: 4QAM 3/4 и LP: 16QAM 3/4 позволяет работать на скоростях HP: 8,78 Мбит/с и LP: 17,56 Мбит/с при параллельной передаче цифровых программ форматов высокой и стандартной точности.

Более того, еще имеется возможность использовать неравномерную иерархическую модуляцию (созвездие) (когда альфа-фактор равен 2, а не 1) для повышения помехоустойчивости потока высшего приоритета (отношение сигнал/шум равно 10,8 дБ вместо 13,7 дБ), а затем сохранить отношение сигнал/шум потока низшего приоритета (2/3 вместо 3/4).

Хотелось бы еще раз подчеркнуть, что иерархическая модуляция, используемая при параллельной работе форматов высокой и стандартной точности, позволяет более эффективно использовать радиочастотные каналы при том же самом спектре предоставляемых услуг.

#### **ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ КОММЕНТАРИИ**

Из вышеприведенных детальных примеров ясно, что иерархическая передача наземного цифрового телевидения DVB-T позволяет реализовать работу двух полностью независимых и самодекодирующихся форматов с частотным уплотнением MPEG-TS. При этом подразумевается, что каждый из этих форматов содержит полный комплект данных по видео, звуку и служебной информации, необходимых при предоставлении пользователям услуг цифрового телевидения.

При планировании параллельной работы, например, передач для переносных / фиксированных или мобильных / фиксированных приемников или форматов высокой / стандартной точности, необходимо предусматривать дублирование источников информации, т.е. выполнять правило независимости частотного уплотнения.

Но это очевидное дублирование не должно рассматриваться как обязательное и само собой разумеющееся свойство: в общем случае, отдельные компоненты по своей сути различны друг от друга в части своего содержания (например, форматы высокой и стандартной точности) или качества (например, стерео- или многоканальный звук).

Только служебная информация может рассматриваться как присущая обоим виртуальным каналам при иерархической модуляции, но, поскольку скорость передачи в обоих случаях довольно скромна, их дублирование не будет означать необходимости введения каких-либо существенных специальных функций в приемниках.

#### **ВЫВОДЫ**

Настоящая презентация показывает, что работа одночастотной сети COFDM представляет собой своего рода вызов вещательным организациям: возникает необходимость контролировать частотные и временные параметры одночастотной сети.

Иерархическая модуляция является еще одним ценным свойством стандарта DVB-T, при котором повышается эффективность использования частотного спектра в пределах одного канала с учетом конкретных типов приемников в различных ситуациях.

Такая свобода для вещателя при введении цифрового телевидения с учетом различных предоставляемых услуг и зоны охвата, без дополнительных частотных ресурсов, является существенным достоинством системы наземного цифрового телевизионного вещания DVB-T.

Компания ИТИС (ITIS) была первой, которая поняла огромные преимущества одночастотной сети вещания и иерархической модуляции. Именно поэтому компанией были разработаны первые конструкции адаптера одночастотной сети наземного цифрового телевидения DVB-T, DVB-T модулятор и DVB-T демодулятор, которые позволили вещателям воспользоваться преимуществами стандартизованных функций, характерных для системы наземного цифрового телевидения DVB-T.

Теперь уместен вопрос: действительно ли являются параметры одночастотной сети наземного цифрового телевидения и иерархической модуляции настолько впечатляющими достоинствами системы с частотным уплотнением ортогональных несущих и кодированием (COFDM)? Надеюсь, теперь Вы будете согласны с положительным ответом на этот вопрос.

## **ОТ АВТОРА**

Автор выражает признательность партнерам Европейских проектов VALIDATE / MOTIVATE и своим коллегам по разработке модуля цифрового телевидения, которые внесли свой вклад в обсуждение и анализ стандарта DVB-T, явившегося предметом настоящей презентации.

Особую признательность автор выражает инженерам ССЕТТ, которые внесли ощутимый вклад в продвижении продукции компании ИТИС на передний край технологии COFDM.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

- [1] ETS 300 744 изд. 1.2.1, (1999-01) Цифровые системы (DVB-T) для телевидения, радиовещания и передачи данных. Структура кадра, канальное кодирование и модуляция для наземных цифровых систем.
- [2] ETS 300 401 Второе издание, 1997. Системы радиовещания; Цифровое радиовещание (DAB) для мобильных, переносных и фиксированных приемников.
- [3] C.R. NOKES, J.D. MITCHELL (Отдел научных исследований и разработок БиБиСи) «Потенциальные возможности иерархических режимов модуляции систем DVB-T» Лондон 16 марта 1999г. Материалы коллоквиума Института инженеров-электротехников 99/072.
- [4] Oliphant, A., и Christ, P., 1998. VALIDATE and MOTIVATE: Совместные научные исследования и разработки по ускорению внедрения систем наземного цифрового телевидения. Труды Международной конференции по вещанию IBC'98 сс 467-472.
- [5] B. Le FLOCH, M. ALARD и C. BERROU. «Частотное уплотнение ортогональных несущих с кодированием». Труды ИИЭР, т 83, № 6, июнь 1995г.
- [6] B. Le FLOCH, R. LASSALLE и D. CASTELAIN. «Цифровое радиовещание для мобильных пользователей». Труды ИИЭР Trans. Cons. Elect. , т 35, № 3, август 1989г.
- [7] M. ALARD и R. LASSALLE. «Принципы модуляции и канального кодирования в цифровом вещании для мобильных пользователей», Технические обзоры ECB № 224, август 1987г.

Gerard FARIA (gfaria@harris.com) - 2000