

EBU

OPERATING EUROVISION AND EURORADIO

TECHNICAL REVIEW

WiB – A New System Concept for Digital Terrestrial Television (DTT)

Внимание!

Данный перевод **НЕ** претендует на аутентичность
и может содержать отдельные неточности.

Оригинал документа на сайте <https://tech.ebu.ch>

WiB – новая системная концепция для цифрового наземного телевидения (DTT)

ПРЕДИСЛОВИЕ

Главная цель EBU Technical Review – критическая оценка новых технологий или разработок в области медиа производства или распространения. Все Technical Review рецензируются одним (или более) техническими экспертами EBU или извне и менеджером технических изданий EBU. Ответственность за мнения, выраженные в данной статье, лежит исключительно на авторе(ах).

Доступ к полной коллекции наших Technical Review на сайте: tech.ebu.ch/publications

Если вы хотите передать тему для EBU Technical Review, обращайтесь по адресу: tech@ebu.ch

РЕЗЮМЕ

Авторы: E. STARE¹, J.J. GIMÉNEZ², P. KLENNER³

Представлена новая системная концепция для DTT под названием “WiB”, где потенциально используются все частоты в диапазоне ультравысоких частот (UHF) на всех передающих (Tx) станциях (т.е. коэффициент повторного использования -1). Интерференция, особенно от соседних передатчиков, работающих на одной частоте и передающих разную информацию, устраняется путем комбинации устойчивого режима передачи, выбора направления приемной антенны и методов устранения интерференции.

При таком подходе DTT может передаваться как один широкополосный сигнал, потенциально охватывающий всю полосу UHF, с одного широкополосного передатчика на каждой станции. Благодаря повышенному использованию спектра этот подход позволяет существенно сократить основную мощность / затраты и увеличить емкость на 37 - 60% при том же покрытии, что и в нынешнем DTT.

Также будет поддерживаться высокоскоростной мобильный прием и мелкоячеистые локальные службы без потери емкости. В статье также рассматриваются возможные дальнейшие разработки WiB, например, удвоение емкости через кроссполлярный MIMO, обратно совместимый с существующими приемными антеннами, и добавление второго, WiB-Mobile, мультиплекса с разделением уровней (LDM) в том же спектре, либо как для мобильного вещания, либо для мобильной широкополосной связи.

ВВЕДЕНИЕ

Основные принципы WiB

WiB – новая широкополосная концепция DTT на базе коэффициента-1 повторного использования, построенная на работе по облачной передаче Wu и др. [1], которая радикально отличается от традиционного DTT и имеет очень привлекательные характеристики [2]. В традиционной многочастотной (MFN) или одночастотной (SFN) сети DTT High Power, High Tower (HPHT) большая емкость обычно передается на каждый канал UHF, например, 33 - 40 Mbit/s в стандарте Digital Video Broadcasting (DVB-T2) [3]. Однако модуляция высокого порядка, необходимая для передачи большой емкости, делает сигнал чувствительным к интерференции, что требует установки передатчиков, работающих на одной частоте, достаточно далеко и строго закономерно. Таким образом, их сигналы ослабляются, чтобы не вызывать помех при приеме. При использовании SFN тот же принцип разнесения применяется к группам передатчиков SFN.

Поэтому в результате этого подхода фактически используется лишь доля (1:N) частот на определенной станции, что называется планированием частот с коэффициентом повторного использования-N (для DTT N типично в диапазоне 4 - 7). К сожалению, поскольку требуемая мощность, согласно Shannon [4], увеличивается в геометрической прогрессии с емкостью, для получения общей большой емкости нужны высокомошные передатчики.

В WiB применяется гораздо более энергоэффективный подход: потенциальное использование всех каналов UHF со всех передающих станций (коэффициент повторного использования-1) и равномерное распределение передаваемой мощности по этим каналам, потенциально как один широкополосный сигнал с использованием одного передатчика, где могут также использоваться существующие спектральные интервалы 0.2 – 0.4 MHz (2.5 – 5%) между каналами UHF.

¹ Teracom, Швеция (erik.stare@teracom.se)

² Universitat Politècnica de València, Испания(jorgigan@iteam.upv.es)

³ Panasonic Europe Ltd, Германия (peter.klenner@eu.panasonic.com)

Использование коэффициента повторного использования -1 и, например, модуляции QPSK с кодовой скоростью $\frac{1}{2}$ дает мобильность и спектральную эффективность около 1 bit/s/Hz. Это примерно соответствует реализации DTT «все-DVB-T2» с существующими типами планирования частот / повторного использования (предполагая пять MFN 40 Mbit/s или шесть SFN 33 Mbit/s). В обоих случаях (с учетом перегрузки) можно предложить около 200 Mbit/s в 224 MHz спектра DTT (470 – 694 MHz), оставшемся после освобождения полосы 700 MHz.

Однако симуляции показывают, что WiB может использоваться со спектральной эффективностью гораздо больше 1 bit/s/Hz (1.37 – 1.60; см. ниже раздел о результатах производительности). Использование устойчивого режима передачи, т.е. режима с низким требуемым C/N, также может устранить необходимость совместного использования защитного интервала / циклического префикса GI/CP), т.к. при низких уровнях C/N прирост от использования GI/CP кажется меньше, чем «боль» от перегрузки.

Обычный режим передачи DVB-T2 – 256-QAM с кодовой скоростью $\frac{2}{3}$. Однако с кодовой скоростью QPSK $\frac{1}{2}$ требуемая мощность передатчика (для данного покрытия) примерно в 50 раз (на 17 dB) ниже для каждого канала 8 MHz. В результате суммарного эффекта сигнал WiB требует всего 10% *общей* мощности передатчика (всех мультиплексов) для DVB-T2, см. Рис. 1. Есть, однако, и другие эффекты WiB, которые могут снизить требуемую мощность, см. ниже.

Мощность [W]
(в масштабе)

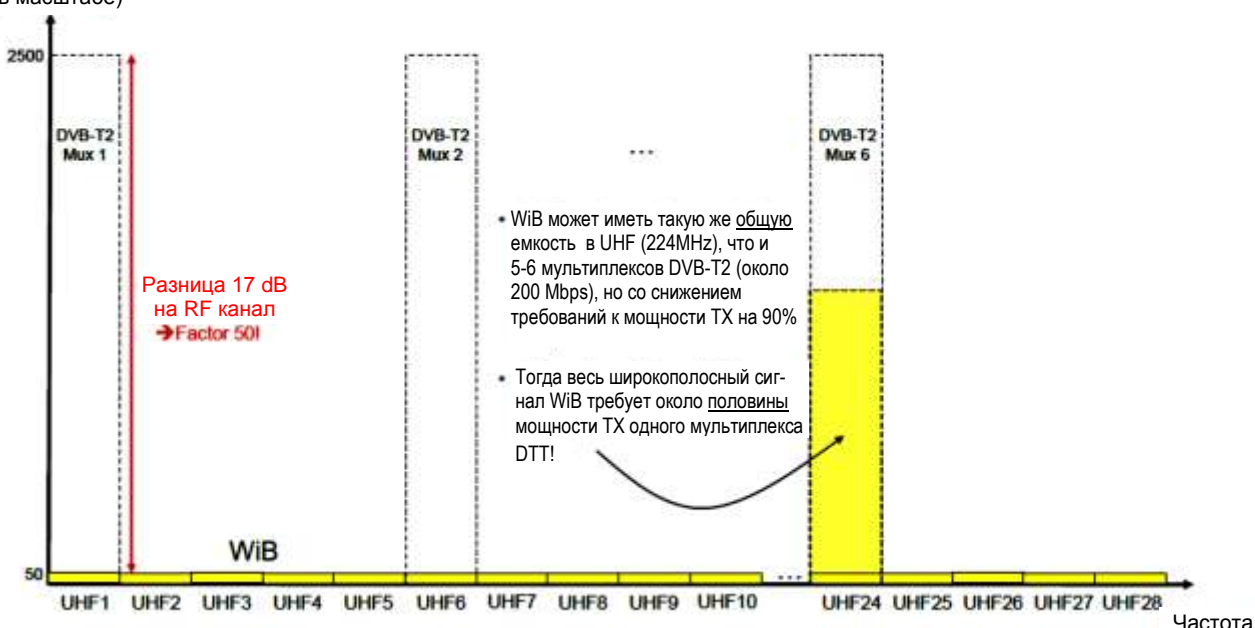


Рис. 1: Требуемая мощность для DVB T2 и WiB

Пиковая скорость передачи данных услуги и диапазон тюнера

Поскольку базовое кодирование / модуляция ограничены WiB из-за коэффициента повторного использования -1, емкость в *одном* UHF канале 8 MHz будет ограничена порядка 7 – 10 Mbit/s. Для компенсации малой емкости в определенном канале UHF предполагается, что услуга может распределяться по нескольким UHF каналам.

Если базовый диапазон тюнера увеличится, например, в 4 раза, т.е. с одного UHF канала (8 MHz) до четырех UHF каналов (32 MHz), пиковая скорость передачи данных также может увеличиться в 4 раза до 28 – 40 Mbit/s в этом расширенном диапазоне. Этого должно быть достаточно для услуг 4k-UHDTV с такими характеристиками как большой динамический диапазон (HDR) и большая частота кадров (HFR).

Побочный эффект увеличения диапазона тюнера – увеличение частотного разнесения, которое обычно повышает производительность, если услуга соответственно чередуется по всему диапазону. Этот эффект можно максимизировать путем чередования услуги по всему используемому спектру, например, методами переключения частоты типа частотно-временного разнесения (TFS), см. [3] и Giménez и др. [5].

Затем можно расширить частотное разнесение для включения всех 28 каналов в UHF полосе 470 – 694 MHz (шириной 224 MHz), но использовать сравнительно малый диапазон тюнера (например, 32 MHz), который ограничивает сложность. Получившаяся схема передачи TFS изображена на Рис. 2.

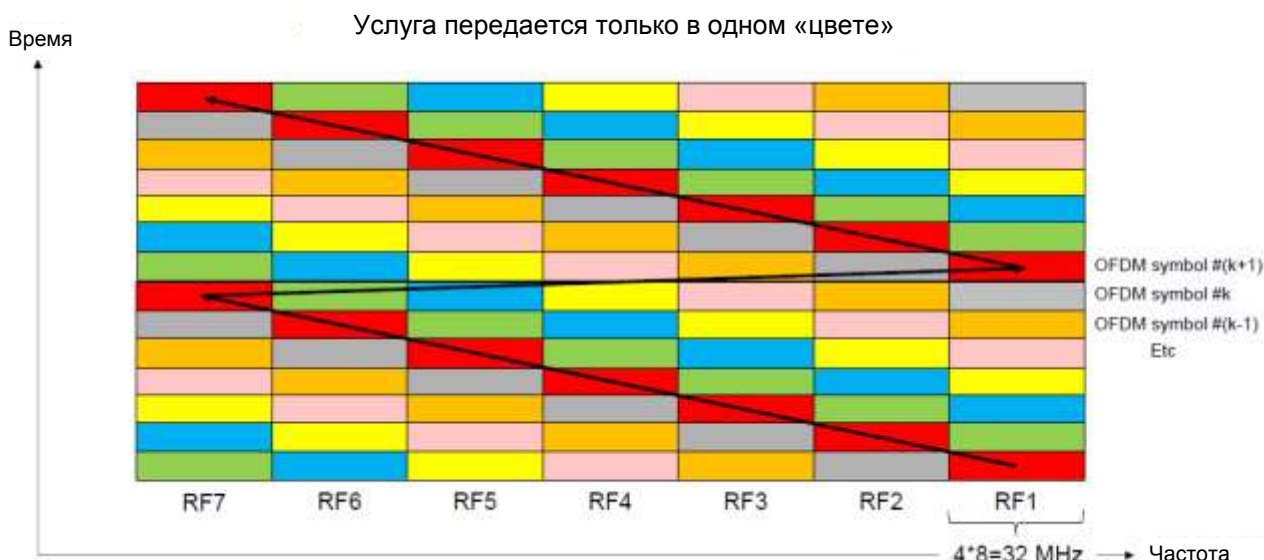


Рис. 2: Возможная схема передачи TFS

Вопросы интерференции

С коэффициентом повторного использования -1 в приемнике будет гораздо меньшее отношение несущей к интерференции (C/I), чем обычно в DTT, и к этому, конечно, надо относиться серьезно. Первый инструмент для устранения помех - устойчивый режим приема (например, 17 dB более устойчиво, чем нынешнее DTT), который, например, может давать C/I, близкое к 0 dB.

Второй инструмент (для стационарного приема на крыше) – когда направленная антенна обычно дает очень высокую *дискриминацию*, т.е. «ослабление» сигналов нежелательных направлений или поляризации. Сигналы с других направлений, кроме намеченного (обычно с нужного передатчика), ослабляются по сравнению с нужным сигналом. Для такой дискриминации антенны есть модель ITU [6], согласно которой дискриминация будет 0 dB в секторе ±20 градусов в направлении антенны, а затем постепенно увеличиваться до 16 dB за пределами сектора ±60 градусов.

Для помеховых сигналов с противоположной поляризацией дискриминация антенны предполагается 16 dB, независимо от угла прибытия.

Наконец, есть методы устранения интерференции, которыми можно убрать ненужные сигналы в определенных условиях, см. ниже главу Устранение интерференции. Следует заметить, что благодаря способности справляться с помехами от соседних передатчиков концепция WiB потенциально позволяет, чтобы все передатчики передавали разный контент.

ЭКОНОМИЯ СЕТЕВЫХ ЗАТРАТ С WiB

Экономия капитальных расходов (CAPEX)

Возможно, самая большая экономия (CAPEX) связана с тем, что можно сократить общую требуемую передающую мощность *оборудования* примерно на 90%, что существенно упрощает инфраструктуру. Это может позволить, например, замену всех передатчиков одним широкополосным передатчиком меньшей мощности (около 50%), чем *каждый* традиционный передатчик DTT. Также могут быть значительно снижены некоторые требования к производительности, например, линейность (одного) передатчика, благодаря устойчивому сигналу, что может упростить конструкцию передатчика и способствовать повышению КПД.

Кроме того, поскольку весь сигнал WiB может передаваться как один широкополосный сигнал, не требуется использование RF-сумматоров; может быть всего один возбудитель и один широкополосный передатчик с радиочастотным (RF) фильтром. Уменьшение мощности на 90% также значительно снижает требования к охлаждению и позволяет простые решения с резервными батареями для многих небольших станций.

Благодаря снижению мощности / охлаждения / объема / веса всего передающего оборудования его легче устанавливать в мачту передатчика, что также устранил необходимость RF фидеров. WiB также вполне пригоден для использования вместе с «активными передающими антеннами», т.е. группа антенных элементов (или даже каждый антенный элемент) потенциально может иметь собственный, очень маломощный широкополосный «мини-передатчик», который обеспечивает *фазированную антенную решетку* с электронным управлением, с помощью которой диаграммы направленности антенн можно приспособить и оптимизировать по желаемым характеристикам.

Экономия эксплуатационных расходов (ОРЕХ)

Как и в случае с CAPEX, снижение *энергопотребления* будет самым большим преимуществом ОРЕХ, но в данном случае снижение затрат будет выражено в счетах за электроэнергию. Кроме снижения мощности на 90%, есть и другие возможные факторы, позволяющие дальнейшее снижение потребляемой энергии, например, устранение затухания в (теперь ненужных) сумматорах, фидер, разделение RF и т.д., что может составить в целом около 3 dB и последующее снижение мощности на 50%. К тому же, увеличение частотного разнесения может дать дальнейшую экономию энергопотребления благодаря лучшему бюджету линии связи. В зависимости от типа передатчика также возможно повышение энергоэффективности в реализации передатчиков в связи с пониженными требованиями к линейности. С точки зрения услуг снизится общая сложность системы из-за меньшего числа системных компонентов, и их чувствительность также снизится благодаря более устойчивому режиму работы. Снижение мощности также может в целом увеличить срок службы передатчиков и снизить вероятность отказов. Кроме того, будет меньше (или вообще никакой?) необходимости в изменении или перепланировании частот после ввода сети в эксплуатацию.

УСТРАНЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ С WiB

Последовательное устранение интерференции (SIC)

Когда целевой сигнал S1 испытывает помехи от равномодулированного, но более сильного сигнала S2, можно применять последовательное устранение интерференции (SIC): сначала демодуляция более сильного сигнала, а затем его перемодуляция и извлечение из входящего сигнала, возможное благодаря тому, что он абсолютно известен после (предположительно успешной) демодуляции.

На последнем этапе можно затем демодулировать целевой сигнал S1. Этот процесс возможен, если отношение несущей к шуму + интерференции (C/(N+I)) демодулируемого сигнала (здесь - S2, а затем S1) больше требуемого C/(N+I). При спектральной эффективности 1 bit/s/Hz (например, кодовой скорости QPSK 1/2) требуемое C/(N+I) близко к 0 dB.

Описанный процесс можно обобщить и использовать для любого количества сигналов, если требование C/(N+I) выполняется для каждого демодулированного и извлеченного сигнала. Пример сценария показан на Рис. 3, где принимаемая мощность с Tx1, Tx2 и Tx3 будет C1, C2 и C3 соответственно, а N – мощность шума. Самый слабый сигнал Tx3 можно демодулировать, если C/(N+I) выполняется в процессе устранения двух более сильных сигналов, а требуемое C/N выполняется для Tx3.

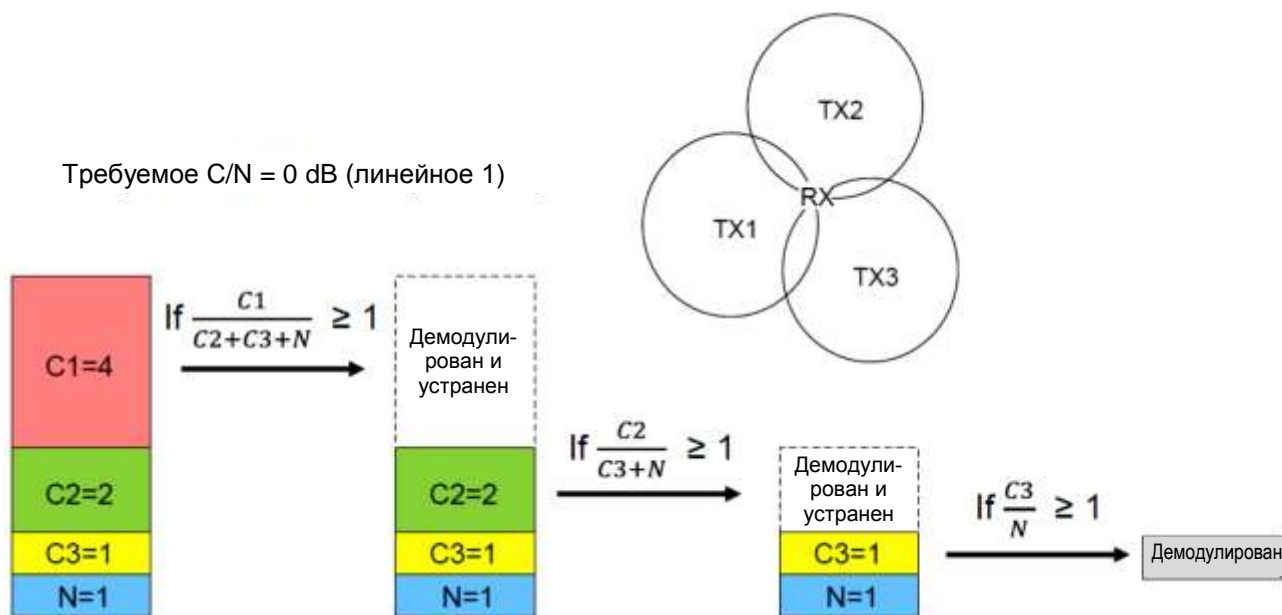


Рис. 3: Пример SIC; самый слабый сигнал Tx3 (принятый с мощностью C3) демодулируется в три этапа

Чтобы SIC работало в WiB (с разумной сложностью приемников), все передаваемые сигналы должны быть полностью синхронизированы с выровненными блоками прямой коррекции ошибок (FEC), т.е. ситуация приема должна выглядеть как традиционная SFN, но с разными передатчиками, передающими разный контент. Для возможности SIC каждый принимаемый передатчик также должен включать рассеянные шаблоны, прямоугольные ко всем остальным принимаемым сигналам передатчиков, участвующих в устранении интерференции, т.е. нужно минимум три ортогональных пилотных шаблона.

Ортогональность гарантирует, что принятые пилотные сигналы, исходящие из соседних передатчиков (Tx1, Tx2, Tx3), не мешают друг другу. Это важно, т.к. позволяет приемнику правильно оценить каждый канал, а результат использовать для устранения интерференции. Простой способ достижения ортогональности – позволить каждому передатчику использовать специальный набор ячеек пилотных шаблонов, которые не используются (нулевая мощность) с соседних передатчиков, которые, в свою очередь, используют другие наборы пилотных ячеек. Когда все передатчики излучают разную информацию, требуемая плотность пилотов отдельного сигнала должна охватывать только анализ естественного эхо в канале, т.е. может быть очень низкой. Затем, для устранения интерференции, плотность пилотных ячеек (включая резервные позиции для обеспечения ортогональности) должна быть, например, в три раза больше базовой, очень низкой плотности, т.е. все равно очень низкой.

Пример: при использовании разноса несущих в соответствии с режимом DVB-T2 16k плотность пилотов 1:96 позволяет обработке естественного эхо до 30 μ s. При трехкратном увеличении для устранения интерференции плотность будет 1:32, т.е. все равно очень низкой. Даже дальнейшее удвоение вследствие, например, MIMO, приведет к плотности всего 1:16, что также является перегрузкой, вызванной этими пилотами.

В контексте SFN часто также может использоваться подобный подход, когда каждый передатчик может передавать рассеянный пилотный шаблон. Приемник затем компонует общий анализ каналов для соответствующих передатчиков SFN на основе анализа каналов отдельных передатчиков SFN. Благодаря устойчивому режиму приема, вероятно, что придется задействовать лишь ограниченное число передатчиков SFN.

Устранение интерференции через формирование луча (Beam-IC)

Совершенно другой подход к устранению интерференции – использование множества приемных антенн, например, в виде фазированной антенной решетки. Даже в самом простом случае, с двумя диполями, они могут иметь луч с электронным управлением, который может динамически максимизировать $C/(N+I)$ принимаемого сигнала. Следует заметить, что $C/(N+I)$ не всегда максимизируется путем полного устранения из-за усиления шума – но путем частичного устранения.

При увеличении количества приемных антенн (и соответствующей обработки) можно исключить более одного принятого сигнала (например, два). Следует заметить, что этот вид устранения интерференции можно считать видом MIMO, где N переданных сигналов принимается N антенн, и потенциально любой из них (или все) демодулируется. Подобно MIMO, каждый принятый сигнал требует пилотный шаблон, ортогональный в пилотным шаблонам в других сигналах, участвующих в процессе устранения интерференции.

Сочетание SIC и Beam-IC

Самый мощный из пока идентифицированных подходов к устранению интерференции – сочетание двух описанных вариантов, SIC и Beam-IC, таким образом, что для каждого демодулируемого сигнала $C/(N+I)$ максимизируется путем соответствующей настройки / оптимизации антенны с электронным управлением для данного сигнала. Когда этот сигнал будет демодулирован / исключен, можно заново оптимизировать формирование луча антенны, чтобы снова можно было максимизировать $C/(N+I)$, на этот раз для следующего демодулируемого сигнала. Все это может выполняться чистой обработкой сигнала на основе сохраненной части (например, ряда символов OFDM) принятых сигналов.

УСЛУГИ С ПЕРЕМЕННЫМ БИТРЕЙТОМ (СТАТИСТИЧЕСКИМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОЖЕСТВА PLP

Услуги с переменным битрейтом (VBR) могут передаваться по DVB-T2 посредством каналов физического уровня (PLP) с переменным битрейтом. Однако в WiB §Последовательное устранение интерференции обычно не работает с PLP с переменным битрейтом, т.к. сигналы с передатчиков (меняющиеся независимо) потом не синхронизируются как надо.

С WiB все PLP имеют равный и постоянный битрейт, а аспект VBR обеспечивается динамическим преобразованием услуги VBR в *переменное число* PLP, а число зависит от мгновенной требуемого битрейта услуги.

На эффективность статистического мультиплексирования это существенно не влияет. С WiB большое количество услуг VBR может использовать общий пул статистического мультиплекса, состоящий из общей емкости полосы UHF 200 - 300 Mbit/s. Это позволит почти идеальное статистическое мультиплексирование услуг UHD, где каждая имеет пиковую скорость до 28 - 40 Mbit/s.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ИЗ СИМУЛЯЦИЙ

Пределы спектральной эффективности с сетевым моделированием НРНТ

Достижимая спектральная эффективность WiB в сети НРНТ была оценена путем симуляций в Монте-Карло. Сеть была смоделирована гомогенной решеткой шестиугольников с коэффициентом повторного использования -1, см. Рис. 4, с расстоянием между соседними передатчиками 60 км и эффективной высотой антенн 250 м.

Спектральная эффективность оценивалась в предположительно худшей точке сети, т.е. посередине между тремя соседними передатчиками, на высоте 10 м выше уровня земли, см. Рис. 4.

Предполагаемая эффективная излучаемая мощность (ERP) была 1 kW на UHF канал 8 MHz, а усиление приемной антенны – 11 dBd, с дискриминацией согласно Рекомендации ITU BT.419 [6]. Предполагаемые потери от снижения антенны и шум-фактор приемника были 4 dB и 6 dB соответственно. Модель распространения была в соответствии с Рекомендацией ITU ITU-R P.1546 [7] на суше.

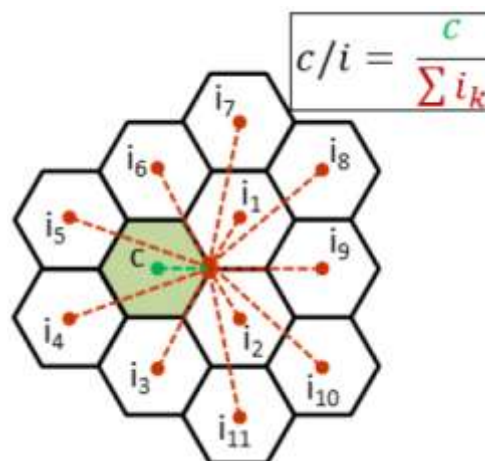


Рис. 4: Решетка шестиугольников

Временные изменения распространения были статистически смоделированы путем подбора двух логарифмически нормальных распределений по кривым распространения для 50% и 10%, и 10% и 1% времени соответственно. Это позволило использовать три модели корреляции: полная корреляция между, а также внутри станций (C), без корреляции между станциями, но с полной внутри станций (U1), без корреляции между и внутри станций (U2).

Замирание было статистически смоделировано двумя процессами. Замирание, независимое от частоты, но зависимое от места, было смоделировано как логарифмически нормальная случайная величина со средним отклонением 0 dB и стандартным 5.5 dB. Модели корреляции между станциями применяется для учета зависимости частотно-зависимого замирания от углового положения и расстояния между станциями [8]. Процесс частотно-зависимого замирания со стандартным отклонением 2 dB был добавлен для моделирования потенциальных частотно-зависимых отклонений принимаемой силы поля согласно Giménez и др. [9]. Критерием покрытия был прием с вероятностью 95% мест в 99% времени в худшей точке сети. Для каждой реализации C/(N+1) определяло максимальную емкость Шеннона, которую можно передавать. Для учета идеального частотного уплотнения была вычислена средняя спектральная эффективность по всем RF каналам.

Было рассмотрено два варианта применения. *Лучший передатчик* моделирует приемник, направленный на лучший передатчик в каждой реализации. *Нужный передатчик* моделирует приемник, направленный на желаемый (не обязательно лучший) передатчик из трех ближайших. Вариант Лучший передатчик соответствует приему, например, национальных услуг *внутри* страны или приему региональных услуг, когда считается «приемлемым» принимать любую региональную услугу с одного из ближайших передатчиков.

Для большой доли мест приема может быть характерен вариант «Лучший передатчик», но на границах между странами по естественным причинам обычно бывает «Нужный передатчик». Вычисляется спектральная эффективность, которую может обеспечить система WiB, чтобы можно было исключить уровни выше желаемого. Поскольку все уровни (передатчики) обеспечивают одинаковую емкость, из них выбирается минимум. В Таблице 1 показана достижимая спектральная эффективность с вероятностью 95% мест в 99% времени.

Таблица 1: Спектральная эффективность WiB

Тип временной корреляции	Лучший Tx	Нужный Tx
Между/внутри станциями (C)	3.41 bit/s/Hz	1.55 bit/s/Hz
Внутри станций (U1)	3.38 bit/s/Hz	1.37 bit/s/Hz
Без корреляции (U2)	4.07 bit/s/Hz	1.60 bit/s/Hz

Благодаря относительно большой дискриминации антенн (16 dB) вариант «нужный передатчик» почти всегда самый сильный, что означает, что устранение интерференции в этом случае лишь незначительно повышает производительность. Однако ожидается, что с меньшей дискриминацией антенн (например, с более простой антенной на крыше, портативным или мобильным приемом) прирост за счет устранения интерференции станет более важным.

Оптимизированная производительность для QPSK с помехами от QPSK

В вышеописанных симуляциях сети НРНТ все помеховые сигналы, слабее сигнала, демодулируемого в данный момент, считались шумом. Это, однако, *пессимистическое* предположение, т.к. созвездие известно, и эта побочная информация может использоваться для повышения производительности.

С информационно-технической точки зрения, на основе концепции взаимной информации, можно вывести теоретически оптимальную производительность для общего случая, где один сигнал QPSK испытывает помехи от другого сигнала QPSK с добавленной случайной фазой. Случайная фаза обычно естественно возникает в результате различных задержек в сети в сочетании с перемежением, но может добавляться в передатчике намеренно во избежание деструктивного наложения ячеек в приемнике в условиях сильно коррелированного распространения Line-of-Sight (LoS).

Это было сделано, и на Рис. 5 показано требуемое C/N для данного соотношения мощностей двух сигналов (C/I) при разной спектральной эффективности (bit/s/Hz). При 1 bit/s/Hz с требуемым C/N=0 dB добавление шумового источника помех с C/I=0 dB не оставит места для шума, а потому сделает требуемое C/N бесконечностью. Однако, если созвездие QPSK учитывается оптимальным способом (идеальная распаковка) с 2-мерными логарифмическими соотношениями правдоподобия (2D-LLR), требуемое C/N становится 6 dB.

Следовательно, использование знаний о созвездии дает очень большой прирост производительности. При таком поведении ожидается дальнейшее повышение производительности сети. На Рис. 6 показаны достижимые скорости при постоянном C/I=0 dB с оптимальной и субоптимальной распаковкой.

Также для примера показаны скорости для Advanced Television Systems Committee (ATSC) 3.0 [10] с QPSK и разными кодовыми скоростями (CR) на основе присутствия случайной фазы, оптимальной распаковки и декодирования суммы-произведения FEC. Как видно, коды ATSC близко следуют идеальной кривой.

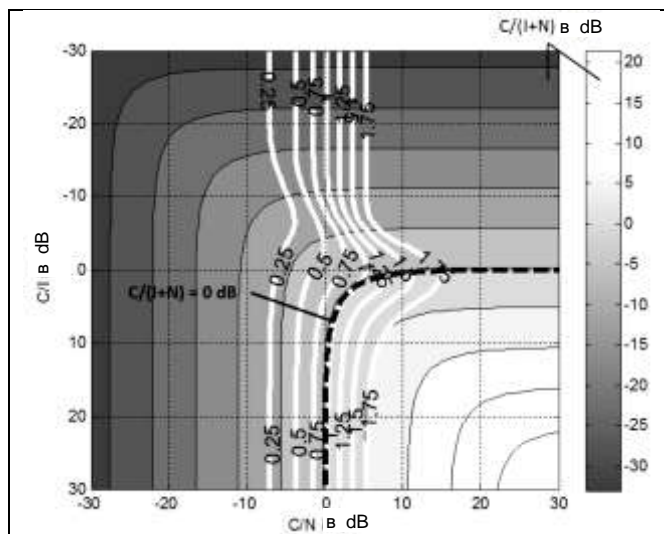


Рис. 5: Достижимые скорости 0.25...1.75 bit/s/Hz для системы 2-Tx с применением случайной фазы и оптимального обнаружения

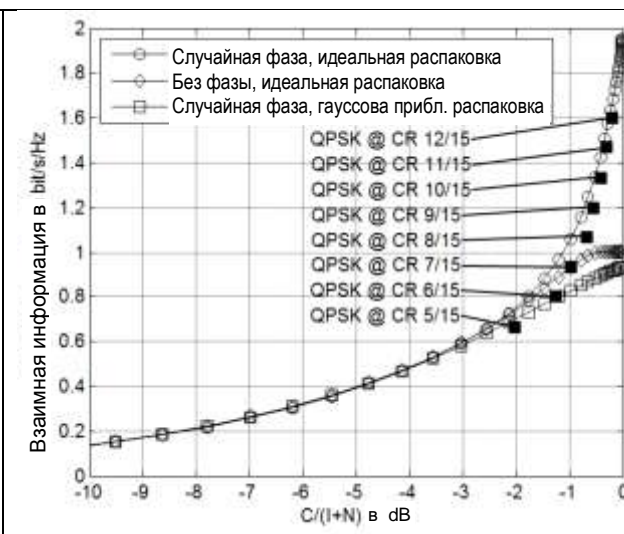


Рис. 6: При C/I=0 dB – достижимые скорости для различной распаковки. Включена производительность с ATSC 3.0 CR (■)

Вопросы избирательности канала

Известно, что при данной общей мощности сигнала в диапазоне В, подверженном добавленному белому гауссову шуму (AWGN), емкость канала достигает максимума, когда принимаемая мощность также постоянна в В; любая временная и/или частотная избирательность снижает общую емкость.

Поскольку реальные каналы часто в некоторой степени избирательны, это может привести к мысли, что вышеупомянутые результаты симуляций оптимистичны. Однако это не обязательно так. Обычно предполагается, что избирательность будет не только в нужном сигнале, но и в соответствующих ненужных.

Например, при избирательности в соответствии со статистикой распределения Релея и с независимыми реализациями для разных сигналов результирующая емкость каналов Релея vs Релея фактически *повысится* по сравнению с классическим случаем AWGN; при спектральной эффективности 1 bit/s/Hz требуемое теоретическое C/I снизится с 0 dB до -3.0 dB.

При учете также потерь кодирования, модуляции и реализации в неидеальном канале требуемое C/I повысится, но вряд ли превысит 0 dB при 1 bit/s/Hz. При необходимости можно искусственно применять оптимизированную избирательность уже в передаваемых сигналах для максимизации емкости для приема с ограниченной интерференцией.

АСПЕКТЫ ПРИЕМНИКА

Приемник может быть приемником ортогонального мультиплексирования с частотным разделением (OFDM) с одним тюнером (или другой системой со множеством несущих) с диапазоном тюнера минимум 32 MHz. Более широкий *виртуальный* диапазон (например, до 224 MHz) обрабатывается либо TFS (переключением частоты), либо дискретизацией с большей скоростью и затем переключением частоты в цифровом сегменте.

Для сохранения того же времени символов OFDM и разнеса несущих в этом диапазоне 32 MHz, что и в режиме DVB-T2 32k в 8 MHz, потребуется быстрое преобразование Фурье (FFT) размером 217 (128k). Для анализа канала три разные оценки (по одной на каждый принятый сигнал передатчика в среде с 3 передатчиками) нужно обработать и передать по цепи разделения сигналов с разных передатчиков (на основе ячеек), чтобы можно было выполнить процесс последовательного устранения интерференции после одного «единовременного» этапа разделения сигналов, см. Рис. 7.

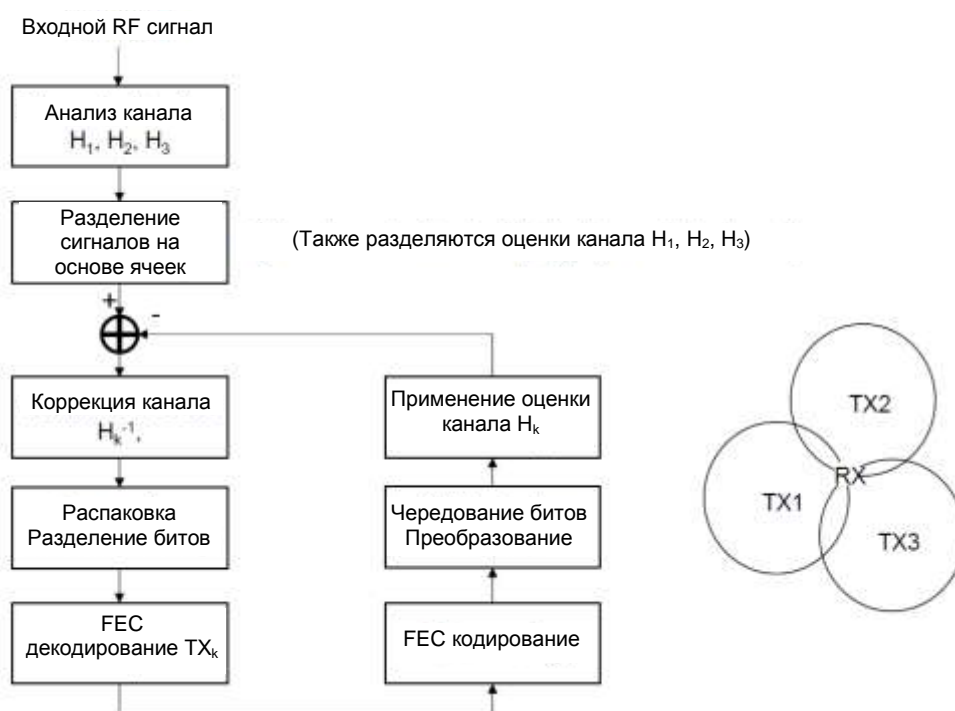


Рис. 7: Упрощенная схема обработки анализа канала в приемнике и устранения интерференции

Сложность самого декодирования FEC может быть аналогична DVB-T2 или ATSC 3.0 (или может быть ниже из-за меньшего ожидаемого пикового битрейта), но устранение интерференции потребует проводить базовое декодирование FEC с большей скоростью (или с большей параллельностью).

Учитывая действие закона Мура после спецификации и реализации DVB-T2 в 2009 г. и до реализации WiB где-то в 2020-х гг., общая сложность приемников WiB не будет слишком высокой.

СЦЕНАРИИ ВНЕДРЕНИЯ

Переход на новые стандарты всегда более или менее болезнен и не получается «разом»; обычно предпочтителен постепенный подход. С подходом *перемежения* WiB будет внедряться подобно DTT в контексте аналогового ТВ, т.е. по-прежнему будет использоваться нынешнее DTT, в WiB передаваться с *некой* мощностью потенциально со всех частот, не используемых текущим DTT. Передаваемая мощность WiB будет регулироваться для станции/частоты каждого передатчика индивидуально, чтобы не вызывать вредных помех.

На переходном этапе придется принять некоторую степень ухудшения DTT, хотя это можно компенсировать более устойчивым режимом передачи DTT. Альтернативно можно внедрить WiB путем альтернативной поляризации (обычно вертикальной), когда интерференция в текущее DTT должна быть сильно ограничена или несущественна.

Можно спроектировать WiB с возможностью использования произвольного подмножества каналов UHF (определенное подмножество, меняющееся на передающих станциях), позволяя при этом устранить интерференции, см. Рис. 8. Это подмножество сначала может быть небольшим, а потом расти, пока WiB не сможет, в конце концов, заменить DVB-T/T2.

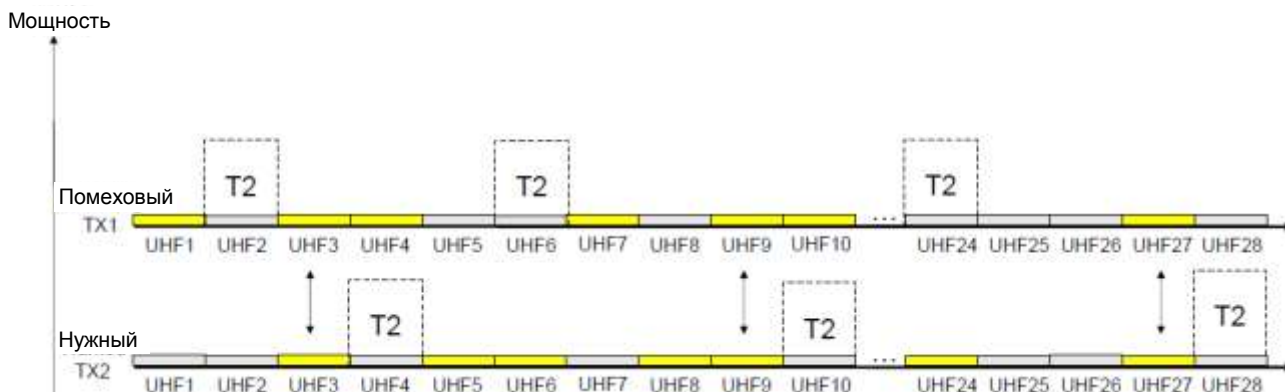


Рис. 8: Перемежение WiB с DTT

РЕТРАНСЛЯТОРЫ И ТРАНСПОЗЕР

Кроме традиционных станций НРНТ, сеть DTT обычно также содержит дополнительные станции разных видов. Основные категории:

1. Небольшие SFN-синхронизированные передающие станции с отдельными потоками (микроволновой канал, спутниковый, волоконный, ...).
2. Ретранслятор в канале (SFN).
3. Транспозер со смещением частоты.

С точки зрения WiB в 1-й категории передающих станций нет ничего особенного; к ним можно относиться как к основным передающим станциям и не уделять особого внимания.

Ретрансляторы в канале тоже возможны так же, как сегодня, хотя и с более широким общим диапазоном.

Особого внимания требует использование транспозеров. Это вид ретранслятора, который принимает сигнал с эфира и ретранслирует его на новой частоте. На первый взгляд может показаться невозможным использование транспозеров в системе, где уже используется весь спектр (коэффициент повторного использования -1). Однако при специальной организации передаваемого сигнала WiB можно использовать и транспозеры, если нужно ретранслировать не более *половины* общей емкости (*услуги категории А*, например, только общественные услуги).

При выполнении таких условий транспозер может ретранслировать услуги категории А (из главного передатчика) на частотах, изначально занятых услугами, не предназначенными для ретрансляции (*услуги категории В*). Транспозер может делать это путем простого сдвига и фильтрации частот.

ДАЛЬНЕЙШАЯ РАБОТА, ПРОДВИНУТАЯ WiB

Вышеописанная базовая система WiB может развиваться в разных направлениях. Здесь мы упомянем только два, которые могут удвоить емкость WiB; WiB-MIMO и WiB-LDM.

С WiB-MIMO и приемом на крыше можно добавить второй независимый сигнал противоположной поляризации и получить двойной сигнал Single Input Single Output (SISO), где один из сигналов будет приниматься старой однополярной (обычно горизонтальной) ТВ антенной благодаря дискриминации поляризации антенны, которая достаточно ослабит ненужную поляриность. При установке новой антенны можно принимать обе поляриности. При частотном преобразовании одного из двух принятых поляризованных компонентов сразу после антенны можно использовать ее текущее снижение для обоих компонентов, а приемник может быть SISO, который извлекает выбранную услугу из соответствующего компонента.

В более продвинутом варианте в некоторых случаях возможно принимать полный объем MIMO даже с однополярной антенной, если два сигнала используют ортогональные пилоты и принятый сигнал достаточно сильный в более слабой поляриности, с учетом дискриминации поляриности, которая, однако, может быть ограничена в простой антенне. В этом случае можно применять SIC между двумя поляриностями.

С WiB-LDM можно добавить второй уровень, WiB-Mobile LDM, наложенный на сигнал WiB-DTT, и передавать его с передатчиков уплотненной сети, обеспечивающих мобильное покрытие сигнала WiB-Mobile. Когда сигнал WiB-Mobile – вещательный, он будет передаваться с большей мощностью, чем сигнал WiB-DTT, позволяя мобильному приемнику принимать его без демодуляции сигнала WiB-DTT. Более слабый сигнал WiB-DTT все равно должен быть достаточно сильным для приема на крыше после извлечения более сильного сигнала WiB-Mobile. Однако, когда сигнал WiB-Mobile является одноадресным (двухточечным), например, в составе 5G *New Radio*, сигнал WiB-DTT нужно сначала демодулировать.

В ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена новая системная концепция системы DTT под названием WiB, основанная на широкополосной передаче с коэффициентом повторного использования -1, которая потенциально позволяет очень большое снижение затрат на сеть DTT (и капитальные-CAPEX, и операционные-OPEX), при этом значительно повышая емкость и покрытие, достижимые, например, в оптимизированной реализации DVB-T2. В самом требовательном варианте «нужный передатчик» симуляции показывают возможное увеличение покрытия на 37 – 60%, предполагая, что опорное DVB-T2 может передавать около 200 Mbit/s на станцию в полосе 470 – 694 MHz.

Сложность приемника можно ограничить до необходимости приема определенной услуги, а не всей передаваемой емкости WiB. Кроме того, концепция WiB также позволяет высокоскоростной мобильный прием без необходимости переключения каналов и потери мощности, с мелкоячеистостью контента (не требуется больших зон SFN) и с возможным снижением (или даже исключением) перегрузки GI/CP. Наконец, WiB можно расширять разными способами, например, обратно совместимым кросс-полярным MIMO, двухуровневым мобильно-стационарным приемом LDM и даже с WiB-DTT и широкополосным WiB-Mobile, которые буквально делят один спектр.

ССЫЛКИ

- [1] Y. Wu, B. Rong, K. Salehian and G. Gagnon, "Cloud Transmission: A New Spectrum-Reuse Friendly Digital Terrestrial Broadcasting Transmission System," in *IEEE Transactions on Broadcasting*, том 58, № 3, стр. 329 - 337, сентябрь 2012.
- [2] E. Stare, J.J. Giménez, P. Klenner, WiB – A new System Concept for Digital Terrestrial Television (DTT), IBC Conference Paper 2016 (Best Conference Paper Award)
- [3] ETSI EN 302 755, Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial broadcasting system (DVB-T2)
- [4] C.A. Shannon, A Mathematical Theory of Communication, The Bell System Technical Journal, том 27, стр. 379–423, 623–656, июль, октябрь 1948
- [5] J. J. Giménez, E. Stare, S. Bergsmark and D. Gómez-Barquero, "Time Frequency Slicing for Future Digital Terrestrial Broadcasting Networks," in *IEEE Transactions on Broadcasting*, том 60, № 2, стр. 227 - 238, июнь 2014.
- [6] ITU Recommendation ITU-R BT.419-3, 1992, Directivity and polarization discrimination of antennas in the reception of television broadcasting
- [7] ITU Recommendation ITU-R P.1546-5, 2013, Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz
- [8] S. R. Saunders and A. A. Zavala, Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, 2nd edition. New York, NY, USA: Wiley, 2007
- [9] J.J. Giménez, D. Gozávez, D. Gómez-Barquero and A. Cardona., A statistical model of the signal strength imbalance between RF channels in a DTT network, ELECTRONICS LETTERS 7 июня 2012 том 48№ 12
- [10] ATSC 3.0 Candidate Standard – Physical Layer Protocol (A/322 :2016), www.atsc.org

ОФИЦИАЛЬНОЕ УВЕДОМЛЕНИЕ

Авторы хотят поблагодарить Oliver Haffenden (BBC) за ценные комментарии. Erik Stare также хочет поблагодарить Magnus Ahxner и Staffan Bergsmark (TeraCom) за ценные дискуссии и вдохновение.

ПРИМЕЧАНИЕ

Данная статья является слегка переработанной и расширенной версией документа IBC в [2].