

СЕТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ УСЛУГ АБОНЕНТАМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ЭКСПРЕССА

© Безлюднов Д.Э., Кубасов И.С., Сундучков К.С., 2014

Описано напрями розвитку концепції інтерактивної гетерогенної телекомунікаційної системи (ІГТС) і місце супутникового радіоканалу в такій мережі. Показано переваги і недоліки супутникової лінії в архітектурі ІГТС. Розглянуто принципи побудови мережі розподілу послуг абонентам залізничного експреса. Розглянуто сигнал на передавальній та приймальній сторонах. Запропоновано мережу розподілу послуг абонентам експреса. Розглянуто ЕМС системи розподілу інформації від центральної станції експреса до абонентів.

Ключові слова: ІГТС, сигнал, залізничний експрес, мережа, ЕМС.

D.E. Bezlyudnov, I.S. Kubasov, K.S. Sunduchkov
NTUU KPI, ITS

DISTRIBUTION NETWORK FOR TELECOMMUNICATIONS SERVICES FOR SUBSCRIBERS OF EXPRESS TRAIN

© Bezlyudnov D.E., Kubasov I.S., Sunduchkov K.S., 2014

This article describes the new concept of providing multimedia services, which require bandwidth 12 Mbit/sec, for mobile subscribers moving at speed of 250-350 km/h on train express. This concept is called – interactive heterogeneous telecommunication system (IHTS). Also describe a place of a satellite channel in this network. There are advantages and disadvantages of satellite trunk line in architecture IHTS are also observed in this paper. We consider the signal at the transmitting and receiving side. Defined restrictions on group channel and OFDM symbol separately. Calculate the following parameters of OFDM symbol that will be used in downlink channel from base station to central station on the railway express:

1. Bandwidth of one subcarrier.
2. Pulse length.
3. Pulse widening factor.
4. Maximum number of services in 400 MHz bandwidth.
5. Maximum number of subcarriers in one OFDM-symbol.
6. Bandwidth of one OFDM-symbol.

Also calculated the total number of OFDM-symbols which require for transmit the whole traffic for 200 subscribers. We have composed those OFDM-symbols in 1 GHz group channels and calculate the total bandwidth. We calculate that parameters for 12Mbit/sec for one service and for two hundred subscribers. It is proposed part of the scheme for the receiver of the OFDM signal for central station on train car. Defined the key operations that should be done for receive complex signal. That scheme will receive OFDM-symbols, unpack it, multiplex sub-channels and produce prepared for future distribution services. Also discuss the principles of construction of distribution network services to subscriber's railway express. Define some key feature of placing routers in the train cars. Proposed 2 different model of distribution network, using Wi-Fi technology, and pros and cons of them are considers. Questions of electromagnetic compatibility for distribution system information from a base

station to express subscribers are considered. Problem that reduces the power of the signal at the receiving side are represented. Proposed the following solutions:

1. Use carrier frequency 5 GHz for Wi-Fi 802.11n technology.
2. Decrease radiant power of routers at the central station that transmit signal to routers at train car.
3. Rationally allocate frequencies for Wi-Fi technology.
4. Use a protective coating on the train car roof to reduce the multipath signal. The formula for calculate the length of protective coat from receiver router are offered.
5. Use protective shields on the train car roof to reduce the multipath signal. The formula for calculate the height of protective shields and length, at which the protective shield should be placed from receiver router are offered. Described other possible negative impacts on distribution system.

Key words: IHTS, signal, railway, network, EMC.

Введение. Изначально концепция ИГТС предполагала наличие только оптоволоконных сетей доставки трафика к базовым станциям (БС). Оптоволоконная линия представляется простым решением, однако в определенных случаях нет возможности использовать наземную инфраструктуру связи, если сеть мобильной связи проходит в труднодоступных местах или значительно удалена от инфраструктуры связи. К недостаткам доставки трафика к удаленным участкам сети посредством оптоволокна можно отнести значительную зависимость качества доставки сигналов во всей сети от повреждений линии на любом участке. Кроме того, прокладка кабеля вдоль магистрали или железнодорожного пути может быть невозможной из-за особенностей рельефа и застройки. Сегодня ИГТС рассматривает два варианта магистральной линии (МЛ) доставки трафика к БС: оптоволоконная линия и спутниковая радиолиния. При любом из двух вариантов на МЛ накладываются требования по синхронности доставки трафика и пропускной способности.

Схема с использованием спутникового канала представлена на рис. 1.

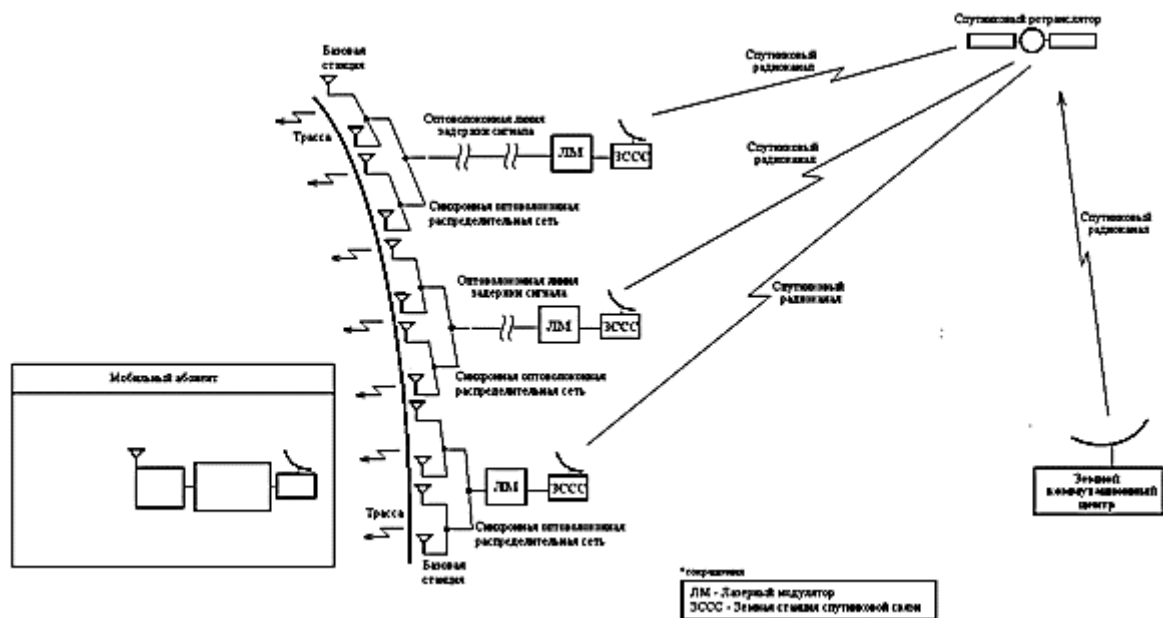


Рис. 1. Структурная схема ИГТС, использующая спутниковый радиоканал

Общая схема ИГТС состоит из земного коммутационного центра, спутникового ретранслятора, нескольких земных станций спутниковой связи, нескольких лазерных модуляторов и линий задержки сигнала, синхронной оптоволоконной сети, множества базовых станций вдоль трассы, мобильного терминала.

Требования ИГТС по высокой пропускной способности и синхронности сигналов предполагают следующие функции для каждого из элементов сети.

Земной коммутационный центр (ЗКЦ) формирует групповой сигнал, состоящий из множества передаваемых услуг, предназначенных всем абонентам сети. Для формирования группового сигнала используется технология OFDM, а совокупный спектр сигнала составляет 2–4 ГГц. Групповой сигнал доставляется на спутниковый ретранслятор посредством спутникового радиоканала.

Особенностью спутникового радиоканала является высокая пропускная способность и ширина занимаемого спектра больше ширины рабочей полосы одного транспондера на спутниковом ретрансляторе.

Спутниковый ретранслятор, расположенный на геостационарной орбите, который принимает групповой сигнал от ЗКЦ, сформированный по технологии OFDM. Транслирует принятый сигнал в направлении всех работающих в сети земных станций спутникового приема посредством спутникового радиоканала, который не отличается по структуре от вышеописанного спутникового радиоканала.

Земная станция спутниковой связи (ЗССС) принимает и усиливает спутниковый сигнал. ЗССС расположена на некотором расстоянии от трассы, таким образом, чтоб суммы длин путей от ЗССС до трассы и от ЗССС до СР для всех ЗССС, работающих в сети, были равными. ЗССС передает усиленный групповой сигнал, который поступил из спутникового радиоканала, на лазерный модулятор.

Лазерный модулятор (ЛМ) формирует групповой сигнал в оптоволоконной линии для последующей передачи. Обладает высокой пропускной способностью и поддерживает TDMA и FDMA технологии модуляции при ширине спектра сигнала 2–4 ГГц. После ЛМ сигнал подается на базовые станции, расположенные вдоль трассы. В том случае, когда требуется внесение дополнительной задержки, может быть использована оптоволоконная линия задержки сигнала.

Оптоволоконная линия задержки сигнала вносит дополнительную задержку сигнала на пути спутниковый ретранслятор – базовая станция. Таким образом на входы всех синхронных оптоволоконных распределительных сетей поступают синфазные сигналы либо из линии задержки, либо от лазерного модулятора.

Синхронная оптоволоконная распределительная сеть (СОРС) обеспечивает трафиком множество БС, расположенных на ограниченном участке трассы. Имеет древовидную структуру для обеспечения синхронности трафика на всех базовых станциях. Длина оптоволоконной линии от входа в распределительную сеть до каждой базовой станции одинаковая.

Базовая станция (БС) выполняет функцию ретрансляции принятого от СОРС сигнала в радиоканал. БС состоит из фотодетектора и рупорной антенны. Все базовые станции вдоль всей трассы излучают один и тот же групповой сигнал одновременно и синфазно.

Трасса – железнодорожный путь или автомобильная магистраль, вдоль которой расположено множество БС, излучающих совокупный групповой сигнал, сформированный по технологии OFDM. В любой точке трассы есть возможность детектировать и принять любое количество услуг, которые предоставляются сетью. Вдоль трассы формируется единый радиоканал, передающий все услуги сети во все точки трассы одновременно и синхронно.

Проблема обеспечения связью абонентов, движущихся с высокой скоростью, становится все более четко выраженной. Примером может служить ж.д. экспресс *Hundai “Сапсан”*, который уже внедрен в эксплуатацию в КНР [1]. Современный уровень техники пока позволяет обеспечить скорость доступа к сети абонентам ж.д. экспресса на уровне 100 Кбит/с. Такая скорость не может удовлетворить потребности абонентов в скорости доступа к сети Интернет.

Для удовлетворения потребностей такого уровня нужно ориентироваться на характеристики сигналов поколения 4G. Для обеспечения бесперебойного и комфортного просмотра онлайн видео нужна скорость 6–12 Мбит/с.

Рассмотрим упомянутый выше ж.д. экспресс, движущийся с достаточно большой скоростью – 250–350 км/час. Этот экспресс состоит из десяти вагонов. В каждом вагоне может быть до 20 абонентов. Все эти 200 абонентов ж.д. экспресса должны получить высококачественный доступ в Интернет при высокой скорости передачи.

В работах авторов [2–4] по развитию Интерактивной гетерогенной телекоммуникационной системы (ИГТС) концептуально обозначены проблемы и пути решения повышения пропускной способности и ёмкости сети, обеспечивающей 1–2 тысячи абонентов, движущихся по автобану или в ж.д. экспрессе со скоростью 300–350 км/час, скорость передачи данных каждому абоненту 6–12 Мбит/с. Основные предложения в этих работах такие:

- разнести прямой и запросный каналы по диапазонам частот; прямой высокоскоростной канал передачи данных организовать в миллиметровом диапазоне длин волн, а запросный канал выполнить в сантиметровом диапазоне длин волн, например, используя сеть LTE;
- разработать и применить селективное преобразование принимаемых несущих частот в миллиметровом диапазоне, осуществляющее в радиоканале с пропускной способностью передачи данных порядка 24 Гбит/с выделение одного или нескольких OFDM-символов с суммарной полосой рабочих частот, размещаемой в диапазоне частот ниже 1 ГГц, где возможна цифровая обработка сигналов.

В работах также предложен ряд других положений, таких как: перераспределение функций БС, отказ от адресной раздачи сигналов услуг базовым станциям, применение технология “радио по волокну” и др.

Были рассмотрены методы передачи сигналов услуг от коммутационного центра до аппаратуры на движущемся объекте. В нашем случае требуется сигналы услуг донести до каждого из абонентов сети, находящихся в разных вагонах экспресса. В нашем примере имеем ж.д. экспресс с 200 абонентами, которые относительно центральной станции на экспрессе не являются мобильными.

Далее будем рассматривать только “прямой” канал, а именно сигнал на приемной станции ж.д. экспресса и стационарную сеть распределения услуг абонентам ж.д. экспресса.

Обработка сигнала на приемной стороне. Для того чтобы рассматривать приём сигнала, нужно знать то, как его формировали на передающей стороне. Для этого рассмотрим основные принципы построения OFDM символа.

Обработка любого цифрового сигнала возможна только на частоте ниже 1 ГГц. Это обусловлено тем, что элементарная база цифровой обработки сигнала, в том числе АЦП (аналогово-цифровой преобразователь), может работать только на частоте ниже 1 ГГц.

Использование OFDM символа с большим количеством поднесущих не представляется возможным, так как оцифровать его будет невозможно. Кроме того, для обеспечения высокого отношения “сигнал–шум” максимальная полоса рабочих частот сигналов услуг, упакованных в одном или нескольких OFDM-символах, должна быть меньше, чем $F_{\max} = 300\text{--}400\text{ МГц}$ [5].

Для этих ограничений рассчитываем параметры OFDM символа. Заданная скорость передачи каждой услуги равна 12 Мбит/с. Используя модулятор QAM-128, получим требуемую полосу пропускания для одной поднесущей:

$$\Delta f = 12 \cdot 10^6 / 7 = 1,71 \text{ МГц} . \quad (1)$$

Длина импульса при данных условиях будет равна:

$$T_i = \frac{1}{\Delta f} = \frac{1}{1,71 \cdot 10^6} = 0,58 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 0,58 \text{ мкс} . \quad (2)$$

Очень малая длина импульса не позволит создать защитный интервал для борьбы с межсимвольной интерференцией. Поэтому нужно увеличить длину импульса, для того чтобы реализовать защитный интервал. Также, если увеличить длину импульса в целое число раз, то из-за кратности сохранится условие ортогональности поднесущих OFDM символа.

Одно из лучших соотношений длины импульса к длине защитного интервала равно 4 к 1. В работах [6–8] сказано, что длина защитного интервала должна быть не менее 4 мкс.

Учитывая все вышесказанное, длина импульса должна быть в четыре раза больше 4 мкс и кратной 0,58 мкс. Рассчитаем, во сколько раз η надо увеличить импульс, при условии, что η – целое:

$$h = \frac{T_s}{T_i \cdot 0,25} = 27,58 \rightarrow 28 \text{ раз} \quad (3)$$

То есть надо увеличить длину импульса в 28 раз, но при этом скорость также упадет в 28 раз. Чтобы сохранить скорость, нужно параллельно использовать 28 поднесущих OFDM символа.

Рассчитаем M – максимальное количество услуг, которые можно разместить в максимальной полосе частот, равной 400 МГц.

$$M = \left[\left[\frac{F_{Max}}{\Delta f} \right] / h \right] = \left[\left[\frac{400 \text{ МГц}}{1,71 \text{ МГц}} \right] / 28 \right] = 8 \text{ услуг.} \quad (4)$$

Рассчитаем N – максимальное количество поднесущих в одном OFDM символе:

$$M \cdot h = 8 \cdot 28 = 224 \text{ шт.} \quad (5)$$

При таком значении количества поднесущих полоса частот OFDM символа будет равна:

$$\Delta F = N \cdot \Delta f = 224 \cdot 1,71 = 383,04 \text{ МГц.} \quad (6)$$

В полосе 1 ГГц можно разместить два OFDM-символа с защитными интервалами. Тогда на защитные интервалы останется:

$$1000 \text{ МГц} - 383,04 \text{ МГц} \cdot 2 = 233 \text{ МГц.} \quad (7)$$

Предлагается разделить всю полосу частот в 1 ГГц на две части по 500 МГц, и в каждую из этих частей посередине разместить OFDM символ, по краям этих частей разместить защитные интервалы.

Рассчитаем защитную полосу частот каждой части общей полосы частот. Полоса в 1 ГГц разбита на две части, и в каждой части предлагается организовать два защитных интервала. При таком условии ширина каждого защитного интервала будет равна:

$$233, \text{ МГц} / 4 = 58,48 \text{ МГц} \quad (8)$$

На рис. 2 изображено размещение двух OFDM символов на полосе в 1 ГГц.

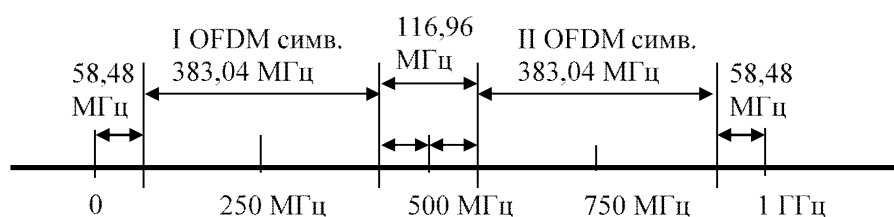


Рис. 2. Размещение OFDM символов в полосе 1 ГГц

Как было сказано ранее, в одном OFDM символе можно разместить лишь восемь услуг. Однако, как было сказано ранее, нужно обеспечить связью 200 абонентов экспресса. Т.е. для обеспечения всех пользователей нужно:

$$\frac{200 \text{ услуг}}{8 \text{ услуг}} = 25 \text{ шт.} \quad (9)$$

Если поместить полосы в 1 ГГц, которые содержат по два OFDM символа, последовательно одну за другой, то для размещения 200 услуг нужна суммарная полоса:

$$\frac{2 \text{ OFDM - симв.}}{2 \text{ OFDM - симв.}} \cdot 1 \text{ ГГц} = 12,5 \text{ ГГц.} \quad (10)$$

Распаковка OFDM символа. На приемной стороне нужно с OFDM символов получить услуги и передать их абоненту. Сигнал при приеме проходит ряд фильтров и смесителей, которые снижают частоту сигнала до 1 ГГц, где возможна цифровая обработка сигнала. Далее этот сигнал должен быть правильным образом обработан, чтобы из него можно было получить информационную последовательность, которую закладывали на передающей стороне.

Для выделения услуг сначала надо выделить отдельные OFDM символы группового канала в 1 ГГц. Для этого можно применить ППФ (полосопропускающие фильтры). Надо иметь два фильтра с центральными частотами 250 МГц и 750 МГц и с полосой пропускания в 383,04 МГц. На выходе каждого из такого фильтра можно получить отдельный OFDM символ.

После выделения отдельных OFDM символов нужно их оцифровать, используя АЦП. Далее оцифрованный сигнал подается на блок быстрого прямого преобразования Фурье. На выходе этого блока образуется набор частот, которые соответствуют поднесущим OFDM символа. Далее эти частоты, а точнее значения частоты, фазы и амплитуды, должны быть мультиплексированы. Далее установлены демодуляторы, которые сформируют на своём выходе цифровые последовательности. Так как при загрузке OFDM символа 28 поднесущих, а точнее 28 цифровых потоков, были выделены под одну услугу, то надо после демодуляторов установить мультиплексор. На выходе мультиплексора получим цифровые последовательности, которые соответствуют услугам абонента.

На рис. 3 изображена часть схемы приемника, которая отвечает за выделение и “распаковку” OFDM символа.

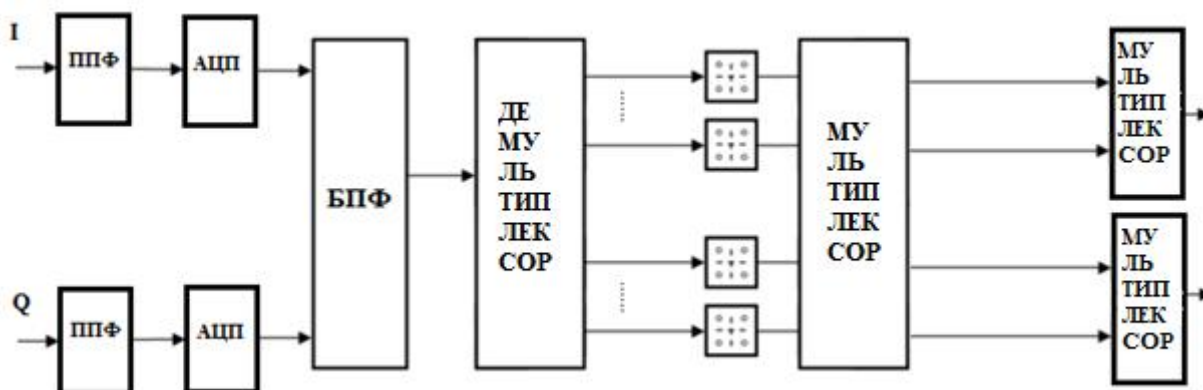


Рис. 3. Часть схемы приемника сигналов услуг

Распределение услуг абонентам. Далее требуется эти услуги каким-то образом передать абонентам. Так как абоненты разнесены по вагонам и эти вагоны должны иметь возможность рассоединятся, то использовать проводное решение не представляется возможным.

Предполагается использование беспроводных технологий WiFi и/или LTE. Эти технологии выбраны, поскольку они позволяют обеспечить высокую пропускную способность.

Каждый вагон, учитывая то, что каждый абонент требует 12 Мбит/с и в вагоне 20 человек, должен иметь суммарную пропускную способность

$$12 \text{ Мбит/с} \cdot 20 \text{ аб.} = 240 \text{ Мбит/с}. \quad (11)$$

Эту скорость способна обеспечить система IEEE 802.11n (WiFi). Следовательно, внутри вагона для беспроводного доступа абонентам будет использоваться система WiFi. Технологию LTE использовать нерационально, так как размеры оборудования и его цена больше, чем оборудования WiFi, учитывая, что WiFi удовлетворяет наши требования.

Так как предельная скорость технологии WiFi 802.11n при использовании роутера с четырьмя антеннами равна 600 Мбит/с, то эта технология позволит обеспечить беспроводным доступом два вагона поезда. Учитывая, что вагонов 10, общая пропускная способность всего поезда равна:

$$240 \text{ Мбит/с} \cdot 10 \text{ ваг.} = 2,4 \text{ Гбит/с}. \quad (12)$$

Исходя из этой требуемой пропускной способности, использовать последовательную передачу от вагона к вагону не представляется возможным.

Варианты расположения роутеров на вагонах экспресса. Вариант 1. Из этого расчёта следует, что требуется установить больше чем один роутер на некоторые вагоны, чтобы иметь возможность как раздавать услуги по вагону, так и принимать сигнал с ЦС. На ЦС нужно установить такое количество роутеров, которое равно количеству вагонов с больше чем одним роутером.

ЦС расположена на вагоне под номером 5 (обозначена большим столбиком на рис. 4). Промежуточные роутеры можно устанавливать в практически любой комбинации, главное, чтобы выполнялось правило – на каждые два вагона требуется 1 WiFi роутер. Также примем во внимание такие особенности:

1. Расстояние между центральной станцией и роутерами должно быть минимальным, для уменьшения затухания ЭМП.

2. Устанавливать роутеры на вагонах с номерами 1 и 10 нерационально (исходя из пункта 1).

3. По возможности установить роутер на пятый вагон, для организации связи с ЦС по кабелю. Выберем номера вагонов, на которые будут установлены роутеры: 2, 4, 5, 7, 9.

Так как при приёме с центральной станции группы сигналов для двух вагонов с общей пропускной способностью:

$$240 \text{ Мбит/с} \cdot 2 \text{ ваг.} = 480 \text{ Мбит/с}. \quad (13)$$

Если пропускная способность превышает половину максимальной пропускной способности WiFi роутера, то роутер на вагоне не сможет передать половину сигнала, которая предназначалась соседнему вагону, так как его канал будет занят. Для решения этой проблемы вместе с четырехантенным WiFi роутером предлагается установить ещё один роутер (достаточно двух антенн), который бы передавал часть услуг на соседний вагон. Назовём систему из приёмного четырехантенного и передающего двухантенного роутеров промежуточной станцией (промежуточная станция обозначена длинным столбиком на вагонах с номерами 2, 4, 5, 7, 9 на рис. 4). Промежуточная станция соединяется с роутером, который раздаёт услуги внутри этого вагона по кабелю (линия обозначена пунктиром на рис. 4), а к соседнему вагону по WiFi каналу (точечная линия между вагонами на рис. 4). На рисунке WiFi роутеры, которые непосредственно раздают услуги абонентам, обозначены короткими палочками на каждом вагоне.

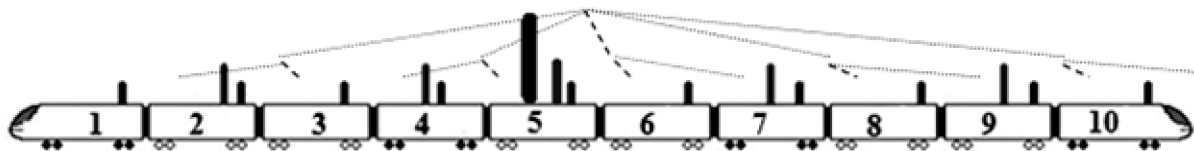


Рис. 4. Расположение роутеров на экспрессе

Вариант 2. Посчитаем общее количество роутеров WiFi, которое надо обеспечить для варианта 1. Учтем также, что цена роутера примерно пропорциональна количеству антенн роутера.

- 5 роутеров с 4 антеннами на ЦС;
- 5 приёмных роутеров с 4 антеннами на промежуточной станции;
- 5 передающих роутеров с 4 антеннами на промежуточной станции;
- 10 передающих роутеров с 4 антеннами на каждом вагоне.

Имеем 25 роутеров, что является достаточно большим числом. Также к минусам первого варианта можно отнести то, что перестановка вагонов с промежуточной станцией может очень негативно повлиять на всю систему раздачи услуг в целом. Надо каким-то образом сделать так, чтобы перестановка вагонов не влияла на работоспособность всей системы.

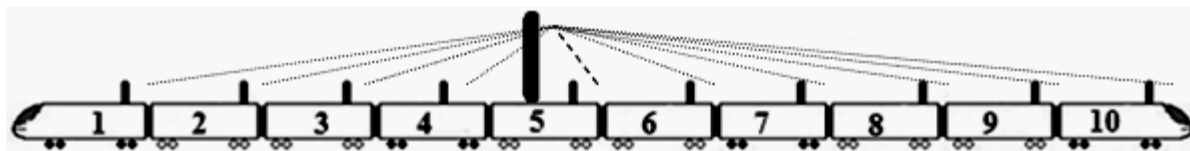


Рис. 5. Схема соединения роутеров и ЦС

На рис. 5 изображен второй вариант размещения роутеров. Все роутеры на вагонах связаны с роутерами на ЦС по каналу WiFi, кроме роутера на пятом вагоне, который связан по кабелю (например, оптоволокну). Этот вариант возможен из-за того, что на каждом вагоне используется четырехантенный роутер с пропускной способностью в 150 Мбит/с на каждую антенну. Одна пара антенн этого роутера настроена на прием, а другая пара – на передачу. Таким образом, общая передающая пропускная способность больше, чем та, которую требует сам вагон.

$$150 \text{ Мбит/с} \cdot 2 \text{ антенны} = 300 \text{ Мбит/с} > 240 \text{ Мбит/с}. \quad (14)$$

Приемная пропускная способность также равна 300 МБит/с. Этой пропускной способности также достаточно для того, чтобы принять сигналы услуг для абонентов вагона экспресса.

Достаточно просто можно видеть, что перестановка любого вагона не влияет на всю систему. При перестановке вагона возможны лишь незначительные затухания сигнала из-за изменения расстояния от ЦС к роутеру на вагоне. Также посчитав общее число роутеров – 10 двухантенных на ЦС и 10 четырехантенных на каждом вагоне, легко видеть, что этот вариант эффективнее и дешевле, так как в этом варианте мы имеем на пять роутеров меньше с меньшим количеством антенн.

Очевидно, этот вариант лучше по всем параметрам предыдущего, поэтому выберем его для дальнейшего рассмотрения.

Улучшение ЭМС системы раздачи услуг. Так как большинство телекоммуникационных систем работает на частотах, близких друг к другу (WiFi 802.11n 2.4 ГГц или 5 ГГц, LTE 2.7 ГГц), то надо обеспечить ЭМС системы. Это очень важно также, учитывая тот факт, что мы имеем 19 беспроводных каналов, в которые входят:

- 10 каналов от пользователя к роутеру, который раздает услуги на вагон;
- 9 каналов от роутеров на вагонах до ЦС.

Изменять технологии нерационально, но можно рационально выбрать несущую частоту и каналы, на которых работает технология Wi-Fi, а также мощность излучения каждого роутера.

Выбор несущей частоты. Технология WiFi 802.11n может работать на двух несущих частотах 2,4 ГГц и 5 ГГц. На частоте 2,4 ГГц технология Wi-Fi 802.11n имеет 14 каналов с перекрытием или три канала без перекрытия, следовательно, рациональнее использовать именно частоту 5 ГГц.

Распределение каналов между роутерами. Канал системы WiFi – это та центральная частота, на которой идет передача в этот момент времени. Система WiFi 802.11n на частоте 5 ГГц имеет 12 каналов. Эти каналы нужно рационально распределить между роутерами, которые находятся на ЦС, и роутерами, которые передают услуги абонентам.

Примем, что длина вагона равна 25 м [4]. Примем также, что все роутеры расположены в одних и тех же местах в вагонах и все роутеры расположены на расстоянии двух вагонов друг от друга. Пронумеруем все промежуточные станции от 1 до 10. Учитывая максимальный радиус действия технологии WiFi, равный 250 м Outdoor и 100м Indoor [5], можно видеть, что i -й роутер не влияет на j -й, если:

$$|i - j| \geq 4 = 100 \text{ м} / 25 \text{ м}. \quad (15)$$

Учитывая эти особенности, можно использовать одинаковые частоты на разных концах поезда, и эти частоты не будут мешать друг другу.

Сформируем некоторые правила, которые нужно учесть при распределении каналов между роутерами:

1. Каналы между роутерами на вагонах и ЦС должны как можно меньше влиять друг на друга и на каналы, которые раздают услуги абонентам.
2. Два соседних роутера, которые раздают услуги абонентам, должны иметь разные частоты.
3. Роутер, который раздает услуги абонентам, должен иметь две разные частоты: одна для приёма, а вторая для передачи.
4. Все частоты, которые соединяют ЦС и роутер на вагоне, должны быть разные. Каждый роутер должен принимать именно ту группу услуг, которая предназначена для его вагона. Если бы частоты были одинаковы, то два вагона с одинаковыми частотами не могли бы отличить, какой сигнал кому принадлежит.

Можно предложить несколько уникальных схем распределения каналов между роутерами на вагонах и ЦС, а все остальные будут комбинациями из данных уникальных. Однако выберем такое распределение частот:

- i -й вагон, внутри вагона, использует i -ю частоту;

- i -й вагон для связи с ЦС использует $\left\lfloor \frac{i+5}{10} \right\rfloor$ частоту, кроме 5-го, который использует

проводную связь (например, по оптоволокну)

Данный вариант имеет свои особенности: все вагоны имеют свою пару частот, которая различна для каждого из вагонов. Это дает возможность в произвольном порядке переставлять вагоны, не нарушая оптимизации ЭМС. Остаются свободными два канала (11 и 12). Свободные каналы можно применять в других целях, например, для организации сети запроса или для организации связи по экспрессу от машиниста к пассажирам и т.д.

Выбор мощности излучения роутеров. Большинство роутеров имеют возможность изменять мощность передатчика. Технические данные о максимальной дальности связи указаны при максимальной мощности излучения. При снижении мощности излучения можно получить некоторые преимущества:

1. Снижение облучения на человека.
2. Повышение ЭМС между вагонами.
3. Снижение мощности потребления роутера.

Однако можно выделить некоторые негативные последствия снижения мощности:

1. Снижение помехоустойчивости.
2. Снижение уровня сигнала на приемном устройстве.

Учитывая отрицательные последствия снижения мощности, многолучевость среды и расстояние между ЦС и роутером на крыше вагона, которое может достигать 125 метров, снижение мощности на этом участке сети не является целесообразным.

Учитывая все вышесказанное, можно сделать выводы, что роутер, который раздает услуги абонентам, может работать на пониженной мощности (75 % или 50 % от максимальной мощности излучения). Канал, работающий между ЦС и роутером на вагоне, должен излучать максимальную мощность для максимальной борьбы с помехами внешней среды и многолучевостью.

Решение проблемы многолучевости. На крышах вагонов экспресса находится большое количество антенн. Каждая из этих антенн, как было обосновано ранее, работает на своей частоте и не мешает другой. Однако вагон, состоящий из стали, хорошо отражает ЭМВ. Вследствие этого канал между ЦС и роутером вагона может принять сигнал, отраженный от крыши. Этот сигнал может быть противофазный прямому сигналу, что в сумме даст результирующий сигнал на приемной стороне, равный нулю. Этого допускать нельзя, так как скорость технологии WiFi 802.11n в 300 МБ/с обусловлена достаточно высококачественным каналом. Нужно принять меры по снижению многолучевости.

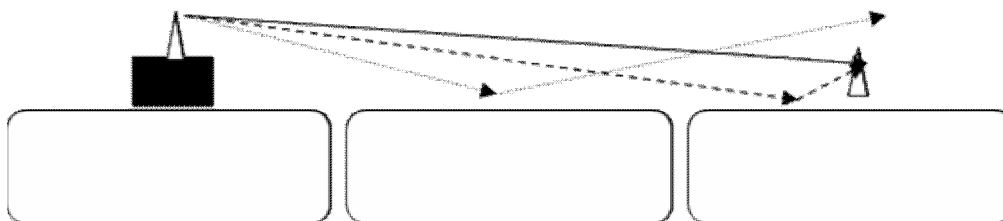


Рис. 6. Три вагона с различными лучами сигнала ЦС

На рис. 6 схематично изображена ЦС и антенна на конечном i -м вагоне. Также на этом рисунке изображено три луча сигнала WiFi: прямой (сплошная линия); отраженный, который не принимается антенной роутера на вагоне (точечная линия); отраженный, который принимается антенной роутера на вагоне (штриховая линия). Как видно из рисунка, луч, который принимается антенной роутера, отражается в непосредственной близости от приёмного роутера. Можно предложить несколько видов защиты от многолучевости в этом конкретном случае:

1. Снижение высоты приемной антенны над уровнем крыши вагона, что приведет к тому, что меньшее количество отраженных лучей будет попадать на антенну. Однако это также снизит качество приема из-за того, что прямой сигнал также будет приниматься в меньшем количестве.

2. Снижение коэффициента отражения от крыши вагона благодаря применению различных защитных материалов, которые поглощают или рассеивают ЭМВ.

3. Экранирование приёмной антенны от отбитых лучей, с использованием экранов в виде отражающих рёбер.

Первый вариант не полностью рациональный, из-за требуемого высокого качества канала WiFi. Поэтому рассмотрим два других варианта.

При расчёте всех дополнительных конструкций на крышах вагонов учтём то, что по ГОСТ 9238-83 “Габариты приближения строений и подвижного состава железных дорог колеи 1520 (1524) мм” максимальный габарит состава может составлять 6250 мм и высота поезда Hundai “Сапсан” равна 4400 мм. Следовательно, на крыше вагона можно размещать дополнительные конструкции высотой до:

$$6250 \text{ мм} - 4400 \text{ мм} = 1850 \text{ мм} = 1,85 \text{ м}. \quad (16)$$

Расчёт защитного слоя. Рассчитаем, какой участок вагона надо покрыть защитным слоем, поглощающим ЭМВ, чтобы подавить многолучёвость системы раздачи услуг Wi-Fi.

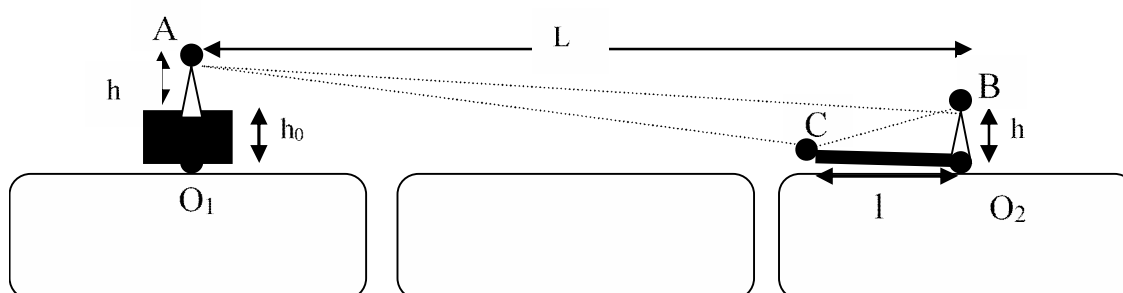


Рис. 7. Линейные размеры отражающей системы

На рис. 7 изображено три вагона. На одном из них расположена ЦС, а на другом приёмный роутер. Введем некоторые обозначения: L – горизонтальное расстояние между приемным и передающим роутером; h_0 – высота ЦС; h – длина антенны (высота антенны над вагоном или ЦС); l – длина защитного покрытия.

Найдем минимальный угол падения луча сигнала, при котором отраженный луч еще попадает на приемную антенну. Рассматривать максимальный угол падения не нужно. Считаем, что антенна расположена под углом 90° к плоскости крыши вагона. Произведя расчеты, получим формулу для расчёта требуемой длины защитного покрытия:

$$l = \frac{h \cdot L}{(h + h_0) + h}. \quad (17)$$

Из полученной формулы можно сделать некоторые выводы:

1. Длина защитного покрытия прямо пропорциональна расстоянию между приемным и передающим роутерами, т.е. длина защитного покрытия зависит от номера вагона и будет расти с удалением от центральной станции.

2. Для снижения длины защитного покрытия можно увеличить высоту ЦС или уменьшить высоту антенны (h в числителе влияет больше, чем в знаменателе). Нецелесообразность уменьшения высоты антенны обосновано выше. Увеличение высоты ЦС может быть невозможным из-за, например, максимальной высоты вагона или других технических показателей вагона.

Рассчитаем наибольшую длину защитного покрытия для последнего вагона.

$$l = \frac{5 \text{ваг} \cdot 25 \text{ м} \cdot 0,1 \text{ м}}{(0,1 \text{ м} + 0,6 \text{ м}) + 0,1 \text{ м}} = 15,625 \text{ м}. \quad (18)$$

Учитывая то, что приёмный роутер находится в центре вагона, слой защитного покрытия для i -го вагона должен находиться не только на i -м вагоне, но и на $(i-1)$ -м вагоне. Эта особенность

ухудшает возможность использования решения с использованием защитного слоя. Однако такое решение может достаточно эффективно снизить многолуче́вость.

Толщина защитного покрытия полностью зависит от материала, из которого оно будет состоять. Ширина защитного покрытия должна быть не меньше, чем линейные размеры антенны. Также ширина защитного покрытия зависит от выпуклости вагона. С увеличением выпуклости можно сделать ширину защитного покрытия меньше, из-за того, что часть сигнала будет рассеиваться в свободное пространство.

Такое защитное покрытие не может полностью ликвидировать проблему многолучевости, потому что сама структура крыши вагона может быть неровной и на крыше могут быть расположены различные другие вспомогательные структуры. Эти неоднородности могут также отразить луч от ЦС в сторону приёмной антенны и ухудшить сигнал на приёмной стороне.

Расчёт заграждающего экрана. Рассчитаем положение и линейные размеры экрана, поглощающего ЭМВ, чтобы подавить многолуче́вость системы раздачи услуг WiFi.

На рис. 8 изображены три вагона с роутерами WiFi и защитный экран – O_3D . При использовании экрана важно, чтобы экран не мешал прохождению прямого луча. Следовательно, верхняя точка экрана должна находиться ниже луча AO_2 .

В предыдущем разделе, при расчёте поглощающего покрытия, была найдена самая дальняя от приёмного роутера на крыше вагона точка, в которой луч, падающий в эту точку от передающего роутера, ещё попадает на приёмную антенну. На рис. 8 это точка C .

Рассмотрим несколько отраженных лучей от точек, которые расположены на отрезках:

- O_1C – отражённый луч уходит в свободное пространство выше антенны;
- CO_3 – отражённый луч должен отражаться от экрана;
- O_3O_2 – луч не может попасть в эту область, т.к. экран препятствует попаданию туда прямого луча.

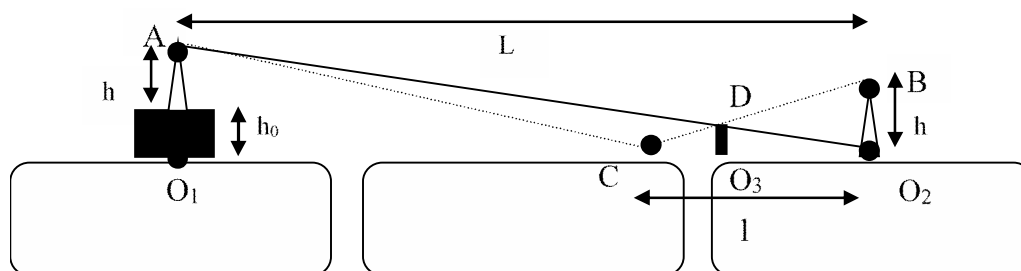


Рис. 8. Линейные размеры экранной системы

Проведя несложные математические преобразования, получим формулы для расчёта основных параметров экрана – расстояние от приёмного роутера O_3O_2 и высоту экрана над крышей вагона O_3D :

$$DO_3 = \frac{h \cdot (h + h_0)}{3h + 2h_0}, \quad (19)$$

$$O_3O_2 = \frac{h \cdot L}{3h + 2h_0}. \quad (20)$$

Из полученных выражений можно сделать несколько выводов:

1. Высота экрана не зависит от расстояния между приёмным и передающим роутерами.
2. Расположение экрана на крыше вагона зависит от расстояния между приёмным и передающим роутерами.
3. При определённом расстоянии между роутерами может получиться, что экран придётся ставить между вагонами. В таком случае экран следует передвинуть на вагон, который ближе всего к точке C на рис. 8.

Из первого вывода видно, что линейные размеры этого экрана намного меньше, чем защитного покрытия. Также экран физически представляет собой пластину токопроводящего металла, приваренную к крыше вагона, что осуществить гораздо проще, чем нанесение защитного покрытия на большую часть вагона. Следовательно, применять защитный экран лучше, чем защитное покрытие.

Однако все предложенные методы понижения многолучёвости негативно сказываются на возможности переставлять вагоны в случайном порядке. Это происходит из-за того, что расположение элементов, которые противодействуют многолучёвости, зависит от расстояния между роутерами.

Вывод. Формирование сигнала услуг является достаточно сложным процессом из-за того, что нужно разместить в 1 ГГц достаточно большое количество высокоскоростных услуг. Прием сигнала, а точнее распаковка OFDM-символа, является простым процессом и реализуется на давно созданных устройствах. Раздача полученных услуг является более сложной задачей. Предложено схему расположения роутеров, которые используют технологию Wi-Fi 802.11n.

Теоретически эта схема выглядит достаточно эффективно, но на практике возможны достаточно большие проблемы, связаны с многолучёвостью, так как экспресс состоит из большого количества металла, который, как известно, хорошо отражает ЭМВ. Частично ситуацию с многолучёвостью можно решить, если правильно выбрать каналы и мощности излучения, на которых работают роутеры Wi-Fi. Предотвратить многолучевость возможно также применением защитного покрытия на крыше вагона или установкой защитного экрана.

Предлагается:

1. Использовать 2-ю топологию сети распределения сигналов услуг прямого канала абонентам экспресса (рис 5).
2. Использовать несущую частоту 5 ГГц.
3. Снизить мощность излучения роутера, который раздает услуги абонентам, до 75 % от максимума.
4. Использовать защитный экран, а не защитное покрытие для борьбы с многолучёвостью.

Но все эти меры не исключают возможности наведения шумов от других устройств, работающих на частотах 2,4 ГГц и 5 ГГц. Такими устройствами могут быть: абонентские Ad-hoc Wi-Fi сети, другие сети Wi-Fi, LTE сеть и др. Эту ситуацию можно улучшить, если использовать более новые роутеры, поддерживающие технологию IEEE 802.11ac, или более новую технологию IEEE 802.11.

1. <http://www.telecoms.com/54943/china-mobile-brings-td-lte-to-high-speed-trains>. 2. Ильченко М.Е., Сундучков К.С., Волков С.Э., Сундучков И.К., Кузява М.А., Сундучков А.К. Интерактивная гетерогенная телекоммуникационная система 4G с беспроводным доступом в миллиметровом диапазоне для предоставления мультимедийных услуг мобильным абонентам // Зв'язок, №7–8, 2008. – С. 28–32. 3. М.Е. Ильченко, К.С. Сундучков, Б.Н. Шелковников, А.С. Яцук и др. Проблемы построения мультисервисной распределительной сети доступа к мобильному терминалу абонента, движущегося с высокой скоростью // Электроника и связь, №2 (61), 2011. – С. 163–169. 4. Метод расчёта параметров радиоканала беспроводного доступа к мобильным терминалам в миллиметровом диапазоне / Сундучков К.С., Голик А.Л., Волков С.Э. и др. // “Известия ВУЗов. Радиоэлектроника” – 2014. – № 6, том 56. 5. Сундучков К.С., Волков С.Э., Яцук А.С. Выбор полосы рабочих частот приемника-декодера мобильного терминала ИГТС мобильной связи // Материалы седьмой международной конференции “Проблемы телекоммуникаций”. – К., ИТС НТУУ “КПИ”. 16–19 апреля 2013. – С. 73–75. 6. Сундучков К.С., Фадеева Е.А. Характеристика задач развития беспроводных телекоммуникационных сетей // Зв'язок. – 2011. – № 1. – С. 18–22. 7. Сундучков К.С., Фадеева Е.А., Волков С.Э. Многолучевость при беспроводном доступе на автобане // Зв'язок. – 2011. – №4. – С. 63–66. 8. Сундучков К.С., Фигурная Е.С., Фадеева Е.А., Стохастическая математическая модель многолучёвости при мобильной связи на автобане // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2012. – № 1 (21). – С. 49–53.