

На правах рукописи



Тиссен Ольга Владимировна

Повышение стабильности и качества передачи
цифрового изображения системы вещания DVB-T2
с технологией модификации контента

05.12.04 – радиотехника,
в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тихоокеанский государственный университет» (ТОГУ)

- Научный руководитель:** **Сай Сергей Владимирович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Вычислительная техника» ТОГУ, г. Хабаровск
- Официальные оппоненты:** **Амосов Олег Семенович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Лаборатории №40 «Интеллектуальные системы управления и моделирования» ФГБУН «Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН», г. Москва
- Попов Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, заместитель директора по телекоммуникациям и информационной безопасности Государственного казенного общеобразовательного учреждения «Центр обеспечения организационно-технической, социально-экономической и воспитательной работы», г. Кемерово
- Ведущая организация:** Общество с ограниченной ответственностью «НПП Триада-ТВ, г. Новосибирск

Защита состоится 6 октября 2020 года в 9 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР), по адресу: 634050, г. Томск, проспект Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ТУСУРа: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/vp4zkfvd>

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.268.01
доктор физико-математических наук



А.Е. Мандель

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Одно из актуальных направлений исследований в связи с переходом на стандарт второго поколения цифрового эфирного телевизионного вещания DVB-T2 (Digital Video Broadcasting – Terrestrial) связано с поиском причин и условий возникновения технических остановок и аварий на оборудовании цифрового вещания при работе в режиме SFN (Single frequency network – одночастотная сеть). Система организации вещания на типовой эфирной передающей станции может быть реализована как с модификацией вещаемого контента, так и без, при этом модификация подразумевает врезку в основной федеральный пакет программ сигналов местного регионального назначения.

Регионализация контента сопровождается выполнением как минимум двух условий – наличие устройства вставки локального контента, способного работать в SFN, и внесение этим устройством минимальной задержки в сигнал на пути его распространения. Неисправности, приводящие к нарушению нормальной работы системы вещания, могут быть связаны не только с физическим отказом оборудования, но и с некорректными параметрами сигналов, относительно которых происходит синхронизация всех устройств.

Состояние проблемы. Исследованиям проблем организации вещания с врезкой контента посвящены работы Карякина Д.В., Карякина В.Л., Куликова С.П., Морозовой Л.А., Пашенко П.С., Перегудова А.Ф., Пищина О. и др. Вопросами синхронизации вещательного оборудования DVB-T2 в режиме SFN в настоящее время занимаются многие авторы, например, Калиновский Д.А., Карякин В.Л., Сидоренко О.И., а общими принципами организации одночастотных сетей – Аверченко А.П., Женатов Б.Д. и Бессонов В.А. Важный вклад внесли зарубежные учёные, в частности Lhermitte Richard, Chauviere Benoit и Deniau Eric, которые опубликовали патент о методе вещания со вставкой контента и устройстве, используемом в данном методе.

Однако, вопросы влияния сетевой задержки цифрового информационного потока T2-MI (T2 Modulator Interface) на корректность работы вещательного оборудования в настоящее время глубоко не исследованы, а также не рассмотрена работа устройств в режиме SFN при отсутствии сигнала синхронизации.

В связи с этим, определение причин некорректной работы оборудования системы вещания DVB-T2 на типовой станции, приводящих к возникновению технических остановок и брака, является актуальной задачей.

Цель работы – повышение стабильности и качества передачи цифрового изображения системы вещания DVB-T2 на передающей станции за счёт исследования и диагностики причин нарушения нормальной работы оборудования при функционировании в режиме SFN с использованием технологии модификации контента.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- классифицировать основные неисправности системы вещания, которые могут возникать на типовой передающей станции;
- разработать методику определения показателей надёжности систем

вещания с использованием и без использования модификации контента;

- определить характеристики изменения сетевой задержки (Network Delay) информационных данных формата T2-MI при стабильном и нестабильном опорном сигнале синхронизации 1PPS (1 Pulse Per Second) на устройстве приёма цифрового потока;

- исследовать работу устройства вставки локального контента в нормальном режиме и при отсутствии сигнала синхронизации от опорного генератора;

- исследовать работу формирователя DVB-T2 модели PT-2000 в режиме одночастотной сети при различных значениях сетевой задержки информационного потока;

- определить возможность приёма телевизионного сигнала при нахождении приёмника в зоне обслуживания двух передающих станций, работающих в одночастотном режиме, с учётом различных вариантов конфигурации параметров замещения на устройствах вставки локального контента.

Научная новизна:

1. Разработана методика расчёта надёжности по коэффициенту готовности системы вещания на типовой передающей станции в зависимости от требуемых вариантов конфигурации замещения контента, отличающаяся применением математического аппарата многослойных графов.

2. Установлена взаимосвязь длительности цикла спада сетевой задержки от величины отклонения периода опорного сигнала синхронизации от номинального значения.

3. Доказано, что работоспособность передатчика модели PT-2000 зависит от попадания входной сетевой задержки потока в один из трёх интервалов, характерных для одночастотного режима работы.

4. Установлена периодичность возникновения ошибок первого приоритета на выходе устройства вставки локального контента при отсутствии опорного сигнала синхронизации.

Теоретическая значимость:

1. Предложена классификация основных неисправностей комплекса оборудования передающей станции на основе теории графов.

2. Обоснован закон распределения задержки как случайной величины на интервале измерения с помощью расчёта статистики хи-квадрат и правила «трёх сигм».

3. Разработана методика расчёта коэффициента готовности системы вещания на типовой передающей станции с помощью математического аппарата многослойных графов.

Практическая значимость:

1. Экспериментально подтверждена возможность надёжного приёма эфирного телевизионного сигнала в одночастотной зоне при различных вариантах конфигурации замещения контента.

2. Определены границы рабочих диапазонов входной сетевой задержки потока для эфирного цифрового передатчика модели PT-2000.

3. Экспериментально определён характер изменения сетевой задержки в

зависимости от стабильности опорного сигнала синхронизации.

Методология и методы исследования. В работе применены: теоретические методы: аппарат теории графов, элементы теории вероятности и математической статистики; эмпирические методы, позволяющие осуществлять сбор, классификацию и обработку полученной информации, а также методы разработки, основанные на применении языков программирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. С помощью разработанной методики расчёта надёжности, отличающейся применением математического аппарата многослойных графов, можно определить, что дополнительное резервирование в системе с каскадной врезкой контента позволяет повысить коэффициент готовности системы вещания на типовой эфирной передающей станции на 9,77%.

2. Длительность цикла спада сетевой задержки цифрового потока T2-MI уменьшается с ростом модуля отклонения периода опорного сигнала синхронизации от номинального значения.

3. Нерабочий диапазон входной сетевой задержки цифрового потока формата T2-MI для передатчика модели РТ-2000 в режиме относительной синхронизации составляет 27,53% от длительности цикла спада задержки при нестабильном опорном синхросигнале.

4. Периодичность возникновения ошибок первого приоритета на выходе устройства вставки локального контента при отсутствии опорного сигнала синхронизации в зависимости от аппаратной реализации устройства составляет в среднем 11 с.

Достоверность результатов. Достоверность результатов подтверждена тем, что экспериментальное исследование производилось с использованием рабочего телекоммуникационного оборудования, в том числе сертифицированных измерительных устройств, прошедших соответствующую поверку. При обработке полученных результатов использованы критерии для отсева грубых погрешностей измерения, а также критерии проверки адекватности используемой модели аппроксимации. Предварительные расчёты подтверждаются результатами экспериментальных исследований.

Использование результатов исследования:

1. Диагностика состояния элементов системы вещания в режиме SFN в процессе настройки и текущей эксплуатации инженерно-техническим персоналом на предприятии ФГУП РТРС «Дальневосточный РЦ» Цех Хабаровск (акт внедрения).

2. Учебное пособие для студентов и инженеров в области телекоммуникаций «Цифровое телевизионное вещание DVB-T2. Регионализация контента» (акт внедрения).

Апробация результатов работы. Основные положения и отдельные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке (ФГБОУ ВО «ДВГУПС», Хабаровск, 2016, 2017);

- Новые тенденции развития в управлении процессами перевозок, автоматике

и инфокоммуникациях (ФГБОУ ВО «ДВГУПС», Хабаровск, 2017);

- Технические науки. Теория и практика (Саратов, 2017);

- XXI Всероссийская научно-техническая конференция Современные проблемы радиоэлектроники (ФГАОУ ВО «СФУ», Красноярск, 2018);

- Новые информационные технологии в научных исследованиях (ФГБОУ ВО «РГРТУ», Рязань, 2018).

Структура и объём работы. Диссертация общим объемом 210 с. состоит из введения, четырёх глав и заключения, содержит 155 с. основного текста, перечень используемой литературы из 67 наименований на 7 с. Основной текст работы включает в себя 49 таблицы и 43 рисунка. Диссертация дополнена 6 приложениями на 47 страницах.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 научных работах, в том числе 4 работы - в изданиях, рекомендованных ВАК к опубликованию основных научных результатов диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук, 6 работ в трудах конференций и иных научных изданиях.

Личный вклад автора. Личный вклад автора состоит в постановке целей и задач исследования, планировании и проведении экспериментальных исследований, анализе и интерпретации полученных данных, формулировании выводов, реализации программного обеспечения, подготовке к публикации докладов и статей. Все результаты получены автором лично или совместно с соавторами при его непосредственном участии. Также вклад автора заключается в проработке существующих научных трудов на тему применения теории графов для проектирования телекоммуникационных сетей и адаптации методики использования графов к рассматриваемой системе цифрового эфирного телевидения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведены общие характеристики диссертационной работы.

1. Организация цифрового телевизионного вещания стандарта DVB-T2

В результате перехода на стандарт DVB-T2 получила развитие технология использования нескольких каналов физического уровня – Physical Layer Pipes (PLP), которая позволяет в едином сигнале транслировать информацию с различными параметрами помехозащищённости, а также группировать сервисы в различные физические (обычно транспортные) потоки. Передача нескольких каналов на одной радиочастоте также позволяет производить вставку локальной информации (регионализацию) на уровне пакетов T2.

Технической спецификацией ETS TS 102773 определён способ замещения локального контента, представляющий из себя врезку местных информационных сигналов T2-MI в общий региональный поток и формирование результирующего T2-MI, подаваемого либо на цифровой телевизионный передатчик, либо далее в сеть распространения. Устройством, обеспечивающим врезку локальной информации, является мультиплексор T2-MI потока, согласно патенту US 2013/0215328A1.

Общая схема организации вещания с использованием устройства врезки контента представлена на рисунке 1.

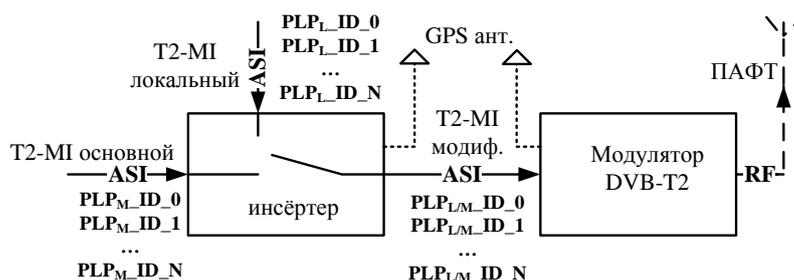


Рисунок 1 – Схема организации вещания с использованием устройства врезки

Необходимо отметить, что:

- вопросы нарушения нормальной работы оборудования передающей станции DVB-T2, связанные с нестабильностью опорного сигнала синхронизации, а, следовательно, с неверной оценкой сетевой задержки потока T2-MI на входе передатчика, в настоящее время требуют подробного исследования, в том числе с использованием действующего телекоммуникационного оборудования для проведения практических измерений;

- вопросы допустимых диапазонов входной задержки потока для некоторых моделей передатчиков DVB-T2, в частности для модели ProTelevision PT-2000, применяемых в настоящее время для эфирной трансляции сигнала цифрового телевидения, также требуют подробного изучения, поскольку данная информация в общем доступе отсутствует;

- технические проблемы организации вещания с использованием устройств врезки локального контента по технологии Local Content Insertion (ETSI TS 102773), связанные с нестабильностью опорного сигнала синхронизации, нуждаются в более глубоком исследовании в связи с тем, что данное технологическое решение является новшеством, старт применения которого был дан в России в 2015 году, в связи с чем детальная статистика работы оборудования врезки на данный момент отсутствует;

Таким образом, цель и задачи работы являются актуальными.

2. Математические основы экспериментального исследования

В п. 2.1 рассмотрена структура сети эфирного вещания, описаны порядок работы комплекса оборудования передающей станции, способы подключения устройств и типы соответствующих используемых интерфейсов. Система вещания на типовой передающей станции может быть представлена в виде портового графа, изображённого на рисунке 2.

Рассматриваемый граф является смешанным, так как в нём присутствуют и рёбра-линии связи и дуги-линии связи. Направление ребра определяется типом используемого интерфейса.

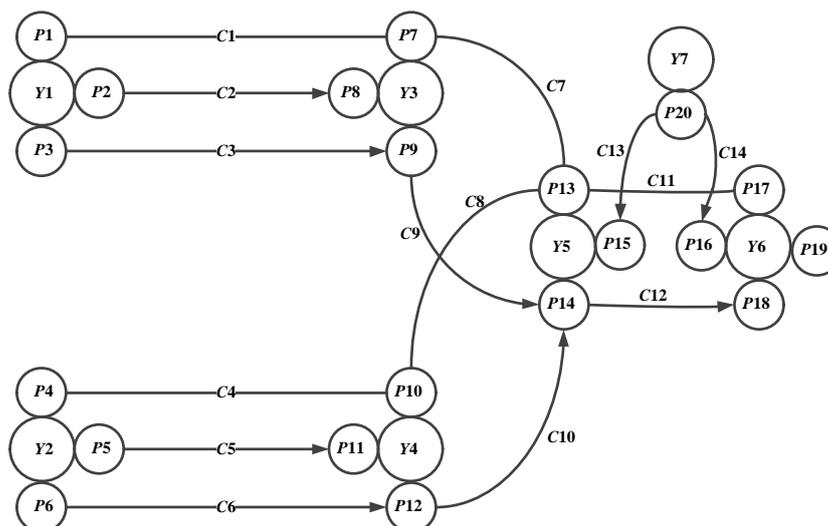


Рисунок 2 – Портовой граф исследуемой системы вещания на передающей станции

Вершины $Y1/Y2$ являются источниками сигналов основного и регионального вещательных мультиплексов – территориально удалёнными точками, где происходит полное формирование T2-MI потоков. Вершины $Y3/Y4$ в данном случае соответствуют комплексу приёмного оборудования основного и регионального сигналов соответственно. Основное назначение данных блоков – приём и демодуляция сигналов, прошедших по каналу доставки. Вершина $Y5$ соответствует устройству врезки локального контента, $Y6$ – эфирному цифровому передатчику стандарта DVB-T2, а $Y7$ – источнику опорного сигнала, где происходит генерация 1PPS / 10 МГц. Группы вершин-портов $p1/p2/p3$ и $p4/p5/p6$ являются портами физических интерфейсов Ethernet, RF (Radio Frequency) и ASI (Asynchronous Serial Interface) соответственно комплекса оборудования формирования T2-MI. В данном случае на графе отражено, что из точки формирования сигнал может доставляться путём любого используемого интерфейса, а также одновременно по нескольким линиям связи с целью резервирования при наличии данной возможности. Группы вершин-портов $p7/p8/p9$ и $p10/p11/p12$ также являются портами физических интерфейсов Ethernet, RF и ASI приёмного оборудования на типовой передающей станции. Порты $p13/p14$ являются портами Ethernet и ASI устройства врезки контента, а порт $p15$ – портом физического интерфейса External Reference, с помощью которого осуществляется приём опорного сигнала синхронизации либо от внешнего источника, либо от встроенного приёмника навигационных систем. Порт $p15$ передатчика DVB-T2 также является портом физического интерфейса External Reference, а $p17/p18$ соответствуют интерфейсам Ethernet и ASI, с помощью которых осуществляется приём модифицированного T2-MI. Вершина-порт $p19$ является портом высокочастотного физического интерфейса Radio Frequency, посредством которого осуществляется излучение сигнала в эфир. Дуги $C2/C3/C5/C6/C9/C10/C12/C13/C14$ соответствуют физическим линиям связи между портами устройств, по которым осуществляется симплексная

передача данных от источника получателю, а остальные рёбра подразумевают передачу данных в дуплексном режиме, то есть с использованием технологии Ethernet.

В п. 2.2 представлена общая характеристика неисправностей, которые могут возникнуть на типовой передающей станции, в виде графа состояний, представленного на рисунке 3.

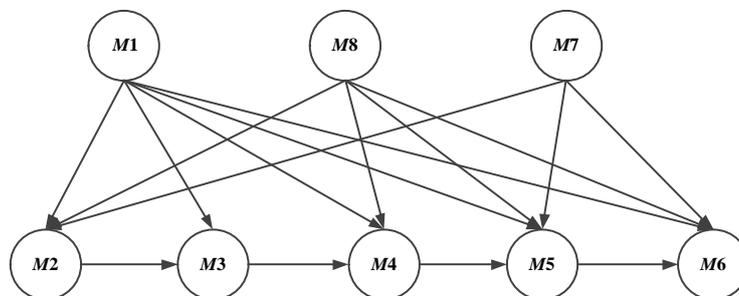


Рисунок 3 – Граф состояний оборудования телевизионной станции

На рисунке 3 обозначено: $M1$ – состояние нормальной работы всего оборудования; $M2$ – неисправности, возникающие в центре формирования и влияющие на корректную работу оборудования станции; $M3$ – неисправности или ошибки, возникающие в канале связи; $M4$ – неисправности приёмного оборудования; $M5$ – неисправности устройства врезки контента; $M6$ – неисправности передатчика DVB-T2; $M7$ – нестабильность / отсутствие опорного сигнала синхронизации; $M8$ – сбои в электропитании оборудования (аварии сети или неисправности ИБП).

Для данного графа рассчитан коэффициент кластеризации C_i . Результаты расчёта следующие: $C_{M1}=0,4$, $C_{M2}=0,17$, $C_{M3}=0,67$, $C_{M4}=0,5$, $C_{M5}=0,3$, $C_{M6}=0,5$, $C_{M7}=0,33$, $C_{M8}=0,33$. Очевидно, что наибольший коэффициент кластеризации соответствует состоянию $M3$, то есть такому состоянию системы вещания, при котором возникают неисправности и ошибки в канале доставки транспортного потока до станции. Это связано прежде всего с тем, что на состояние $M3$ не оказывают непосредственно влияния состояния $M7$ (нестабильность/отсутствие опорного сигнала) и $M8$ (аварии по электропитанию), так как канал связи является физической средой передачи данных, которая сохраняется и при отсутствии питания передающего или принимающего оборудования, а также не имеет отношения к качеству временных штампов синхронизации. Таким образом, группа узлов $M1 - M2 - M3 - M4$ связаны между собой сильнее, чем со всеми остальными вершинами графа.

Представленные в виде графа возможные состояния системы вещания позволяют в дальнейшем определить параметры надёжности схемы.

В п. 2.3 настоящей главы предложена методика расчёта коэффициента готовности для рассматриваемой системы вещания с устройством вставки локального контента, для системы с двухступенчатой врезкой контента при последовательном включении сплайсера и без устройств модификации контента. Для моделирования использована технология многослойных графов. Графы для каждого рассматриваемого варианта представлены на рисунках 2.5 – 2.7

диссертации. Каждый граф состоит из нескольких уровней, характеризующих возможные состояния отдельного блока оборудования. Ниже приведены итоговые формулы для расчёта суммарного коэффициента готовности:

- системы организации вещания с инсёртером:

$$K_{Г\Sigma} = (K_{ГА1} \cdot K_{ГВ1} + K_{ГС1} \cdot K_{ГД1} - K_{ГА1} \cdot K_{ГВ1} \cdot K_{ГС1} \cdot K_{ГД1}) \cdot K_{ГЕ1} \cdot K_{ГФ1},$$

где $K_{ГА1}$ - коэффициент готовности канала доставки основного потока Т2-МІ; $K_{ГВ1}$ - коэффициент готовности приёмника основного потока Т2-МІ; $K_{ГС1}$ - коэффициент готовности канала доставки модифицирующего потока; $K_{ГД1}$ - коэффициент готовности приёмника модифицирующего потока; $K_{ГЕ1}$ - коэффициент готовности устройства врезки контента; $K_{ГФ1}$ - коэффициент готовности передатчика DVB-T2.

- системы без регионализации:

$$K_{Г'\Sigma} = K_{ГА1} \cdot K_{ГВ1} \cdot K_{ГФ1}$$

- системы с каскадной врезкой контента:

$$K_{Г''\Sigma} = [(K_{ГА1} \cdot K_{ГВ1} + K_{ГС1} \cdot K_{ГД1} - K_{ГА1} \cdot K_{ГВ1} \cdot K_{ГС1} \cdot K_{ГД1}) \cdot K_{ГЕ1} + K_{ГГ1} \cdot K_{ГН1} - (K_{ГА1} \cdot K_{ГВ1} + K_{ГС1} \cdot K_{ГД1} - K_{ГА1} \cdot K_{ГВ1} \cdot K_{ГС1} \cdot K_{ГД1}) \cdot K_{ГЕ1} \cdot K_{ГГ1} \cdot K_{ГН1}] \cdot K_{ГГ1} \cdot K_{ГФ1}$$

где $K_{ГГ1}$ - коэффициент готовности канала доставки контента для сплайсера; $K_{ГН1}$ - коэффициент готовности оборудования приёма контента для сплайсера; $K_{ГГ1}$ - коэффициент готовности сплайсера.

В п. 2.5 рассмотрен метод расчёта величины сетевой задержки информационного потока Т2-МІ.

На рисунке 4 представлена схема распространения цифрового потока от источника Т2-МІ до передающей станции DVB-T2.



Рисунок 4 – Схема распространения цифрового потока

На рисунке 4: 1 – выход формирователя Т2-МІ / шлюза, где величина сетевой задержки T_{ND} цифрового потока соответствует установленной оператором в настройках источника. Точка 2 – выход оборудования, которое является передающей частью канала доставки потока, например, выход спутникового или оптического передатчика. Точка 3 – точка приёма сигнала с канала связи перед демодуляцией его в приёмной части. Точка 4 – выход приёмного оборудования, где передаётся демодулированный Т2-МІ на вход цифрового передатчика.

Сигнал с предустановленной задержкой T_{ND} , проходя через канал доставки, претерпевает временные потери $T_{распр.}$, то есть задерживается в линии связи на некоторое статическое время. Время задержки постоянно, так как характеристики каналов доставки, оказывающие на него влияние, статичны и не меняются с течением времени. Параметр T_{NDTX} - величина сетевой задержки информационного потока, принимаемого на удалённой телевизионной передающей станции, определяемая как:

$$T_{NDTX} = T_{ND} - T_{распр.}$$

Величина сетевой задержки на входе приемника цифровых данных T_{NDTX} при относительной синхронизации будет рассчитываться по формуле:

$$T_{NDTX} = \begin{cases} T_{изл.} - T_{пр.}, & \text{если } T_{пр.} < T_{изл.} \\ 1 - (T_{пр.} - T_{изл.}), & \text{если } T_{пр.} > T_{изл.} \end{cases} ,$$

где $T_{изл.}$ - требуемое время излучения суперкадра, является фиксированной величиной и при использовании относительного режима синхронизации определяется с момента поступления очередного импульса 1 PPS; $T_{пр.}$ - время приёма формирователем DVB-T2 очередного суперкадра цифрового информационного потока, измеренное относительно поступления импульса опорного сигнала.

3. Методика экспериментального исследования

В данной главе описана методика поэтапного проведения экспериментальных исследований с использованием телекоммуникационного оборудования:

- исследование сетевой задержки потока в точке приёма: на аппаратный анализатор транспортных потоков T-Vips TNS-546 поступает сигнал в формате T2-MI, инкапсулированный в пакеты MPEG-2 TS. На вход внешнего опорного сигнала анализатора подан сигнал 1 PPS от приёмника навигационных систем ГЛОНАСС/GPS. На этот же вход с помощью ручной коммутации подаётся модифицированный сигнал 1 PPS от генератора сигналов АКПП-3413/3 с принудительно изменённой длительностью. Измерения задержки произведены на основе временной диаграммы, формируемой аппаратным анализатором TNS-546, параметры current drift (cd) и current frequency offset (cfo) определены устройством при каждом изменении параметров сигнала синхронизации.

- исследование режима работы устройства замещения локального контента: на устройство замещения поданы основной и модифицирующий потоки T2-MI, а также сигнал синхронизации 1 PPS от спутникового навигационного приёмника. Устройство врезки настроено на замещение двух каналов физического уровня (PLP_1 и PLP_2), а выходной результирующий T2-MI поток (T2-MIрез) подан на аппаратный анализатор TNS-546. Характер сообщений, выдаваемых анализатором при мониторинге результирующего T2-MI, фиксируются в журнале событий анализатора. Затем инсёртер настраивается на приём опорного сигнала синхронизации от внешнего источника, при этом внешний источник отсутствует. В этом случае анализатором Nevion также осуществляется мониторинг и фиксация событий в выходном результирующем потоке T2-MIрез.

- исследование характера работы формирователя DVB-T2 в режиме одночастотной сети: на модулятор PT-2000 поступает цифровой информационный поток T2-MI от T2 шлюза, который также дублирует выходной поток на анализатор цифровых сигналов TNS-546. Модулятор настроен на работу в режиме System B, а также синхронизирован относительно опорного сигнала от встроенного GPS/ГЛОНАСС приёмника. Выход модулятора подключён к согласованной нагрузке-эквиваленту, сопротивлением 50 Ом. На первом этапе, на устройстве формирования T2-MI устанавливается относительный режим синхронизации, а величина максимальной сетевой задержки варьируется от 50 до

999 мс с шагом 50 мс, согласно программе эксперимента. На втором этапе, на устройстве формирования T2-MI устанавливается абсолютный режим синхронизации, величина сетевой задержки варьируется в тех же пределах.

- исследование режима работы SFN с устройством регионализации: с помощью двух модуляторов PT-2000 и двух инсёртеров TTV-PLPSW-0401 собрана схема участка одночастотной сети. Параметры модификации контента на каждом устройстве врезки изменяются в соответствии с программой эксперимента, возможность декодирования сервисов каналов физического уровня определяется с помощью включённых в тракт ТВ-анализатора и приёмника.

Полученные результаты зафиксированы в виде таблиц, а также фотографий и снимков экрана компьютера, представленных в приложениях Б, В и Д.

4. Результаты анализа экспериментальных данных

4.1 Обработка результатов измерения сетевой задержки потока

Измерение сетевой задержки T2-MI производилось согласно схеме эксперимента (рисунок 5) для вариантов отклонения опорного сигнала синхронизации 1PPS на -1, -2, -3, -4, -5, -6, +1, +2, +3, +5 и +10 мкс от номинального значения.

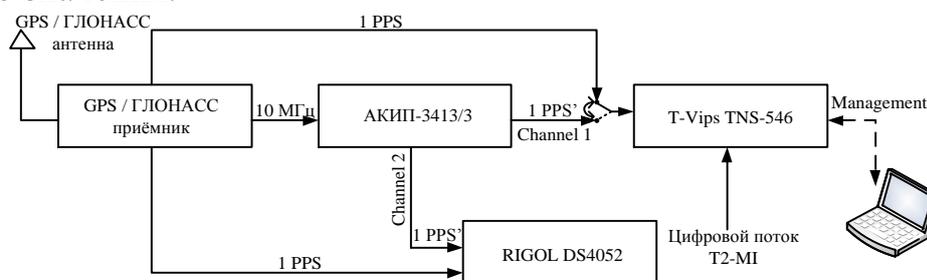


Рисунок 5 – Схема измерений задержки

Графики измеренной сетевой задержки потока с помощью аппаратного анализатора транспортных и T2-MI потоков Nevion TNS-546 представлены в приложении Б диссертационной работы.

Полученные значения задержки табулированы и отфильтрованы на предмет наличия грубых погрешностей измерения с помощью критерия Стьюдента. В результате отсева для случаев $\Delta PPS = -6; -1$ мкс объём выборки составляет 58 значений, для случаев $\Delta PPS = +1; +3$ мкс – 59 значений, для всех остальных вариантов измерения – 60 значений.

Для подбора модели аппроксимации графика задержки была выдвинута основная гипотеза H_0 о том, что выбранное линейное уравнение регрессии адекватно. Соответственно, альтернативная гипотеза при этом – H_1 – «линейное уравнение регрессии неадекватно». Для проверки выдвинутых гипотез использован F-критерий Фишера для вероятности $\alpha = 0,05$, который показал, что в большинстве случаев экспериментальное значение F-критерия превышает критическое значение, то есть $F_{\text{эсп}} > F_{(\alpha, m1, m2)}$. Это свидетельствует о том, что выбранное уравнение для моделирования графика сетевой задержки адекватно, и гипотеза H_0 принимается. Однако, в случаях, когда $TPPS = 0,999999; 1,0; 1,000001$ значение $F_{\text{эсп}} < F_{(\alpha, m1, m2)}$, что означает отвержение гипотезы H_0 и принятие H_1 . При первичном рассмотрении получается, что при синхронизации устройства

приёма цифрового потока T2-MI от опорного сигнала, полученного от приёмника спутниковых навигационных систем, предположение о линейности сетевой задержки не соответствует действительности. При подборе аппроксимирующих прямых был вычислен коэффициент достоверности аппроксимации R^2 для каждого случая с помощью программных средств MS Excel, результаты вычисления представлены в таблице 4.3 диссертации. Минимальный коэффициент достоверности аппроксимации $R^2 = 0,00003$ также соответствует случаю синхронизации оборудования от высокостабильного опорного сигнала. Необходимо отметить, что, согласно снимку экрана компьютера с интерфейсом анализатора Nevion TNS-546, представленному на рисунке Б.1б (приложение Б), график сетевой задержки при нулевом смещении опорного сигнала на длительном интервале наблюдения (1 час) представляет собой линейную зависимость. Тогда ситуация с несоответствием подобранной модели для случаев $TPPS = 0,999999; 1,0; 1,000001$ с может быть объяснена следующим образом:

- во-первых, разброс значений на интервале измерения, тем больше, чем выше отклонение периода опорного сигнала от номинального значения ΔPPS . С ростом отклонения как в положительную, так и в отрицательную стороны зависимость приобретает линейный характер. Для того, чтобы подтвердить такую взаимосвязь был рассчитан коэффициент корреляции $r_{\text{кда}}$ между величиной разброса значений и коэффициентом достоверности аппроксимации для каждого случая, который составил 0,9516 для вариантов отклонения $\Delta PPS = -1, -2 \dots -6$ мкс и 0,9148 для $\Delta PPS = 1, 2 \dots 10$ мкс. $r_{\text{кда}}$ стремится к единице как на участке отрицательного, так и на участке положительного смещения периода опорного сигнала, следовательно, имеет место прямая взаимосвязь;

- во-вторых, с точки зрения практической эксплуатации, зависимость сетевой задержки от времени в идеальном случае – есть прямая линия, что говорит о стабильности величины задержки именно в конкретной точке приёма потока T2-MI, что подтверждается графиком на рисунке Б.1б приложения Б.

Таким образом, при проверке адекватности модели согласно условиям критерия Фишера, случаи при $TPPS = 0,999999; 1,0; 1,000001$ с являются случаями с минимальным разбросом значений, то есть рассматриваются «в области больших времён» относительно прочих вариантов измерения, поэтому возникает конфликт математического описания и практического смысла. Следовательно, утверждать, что аппроксимация графика задержки при нулевом и малом отклонении периода опорного сигнала не носит линейный характер неправильно с точки зрения практической эксплуатации.

Подобранная линейная аппроксимация графиков задержки, которая имеет определённый наклон к оси времени в зависимости от величины отклонения периода опорного сигнала, может быть представлена геометрически на рисунке 6.

Циклом спада в данном случае является интервал времени, за который величина сетевой задержки из точки максимума достигнет точки минимума.

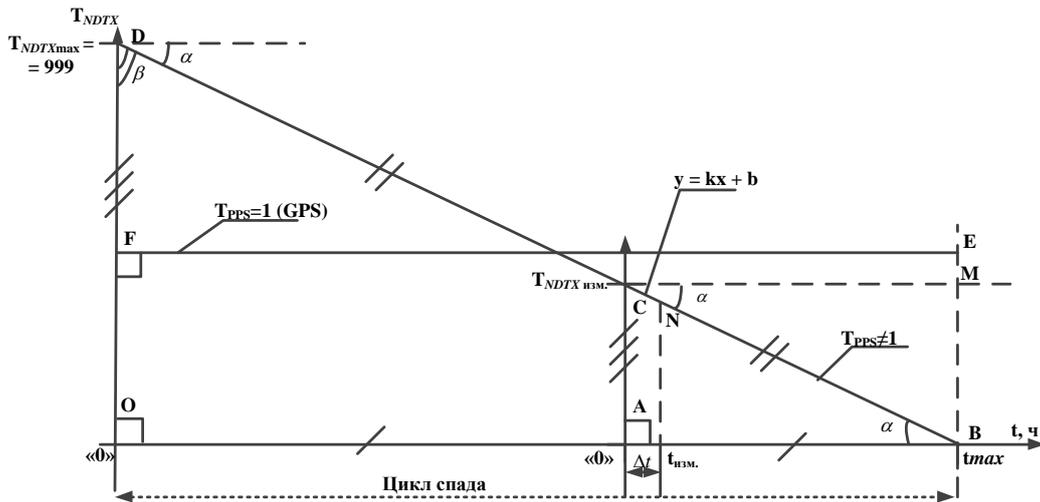


Рисунок 6 – Геометрическое представление аппроксимирующих прямых

Временной интервал $t_{max} = OB$ определяется из выражения:

$$t_{max} = OB = 999 \cdot AB / T_{NDTX_{изм.}} = 999 \cdot T_{NDTX_{изм.}} / T_{NDTX_{изм.}} \cdot k = 999 / k \cdot 3600, \text{ ч,}$$

где k - угловой коэффициент наклона прямой.

Результаты расчёта цикла спада представлены на графике рисунка 7.

Через интервал времени t_{max} после достижения максимума величины сетевой задержки, её значение достигнет минимума, затем снова резко вернётся в максимум. Поскольку отрицательного значения сетевой задержки не существует, так как её величина есть разность между требуемым временем излучения и временем приёма текущего суперкадра передающим или анализирующим устройством, то переход через условный нуль с физической точки зрения означает перенос момента излучения в следующую секунду. В результате переноса момента излучения образуется резкий скачок от минимума к максимуму величины сетевой задержки, поэтому в течение длительного периода наблюдения зависимость T_{NDTX} от времени носит выраженный пилообразный характер.

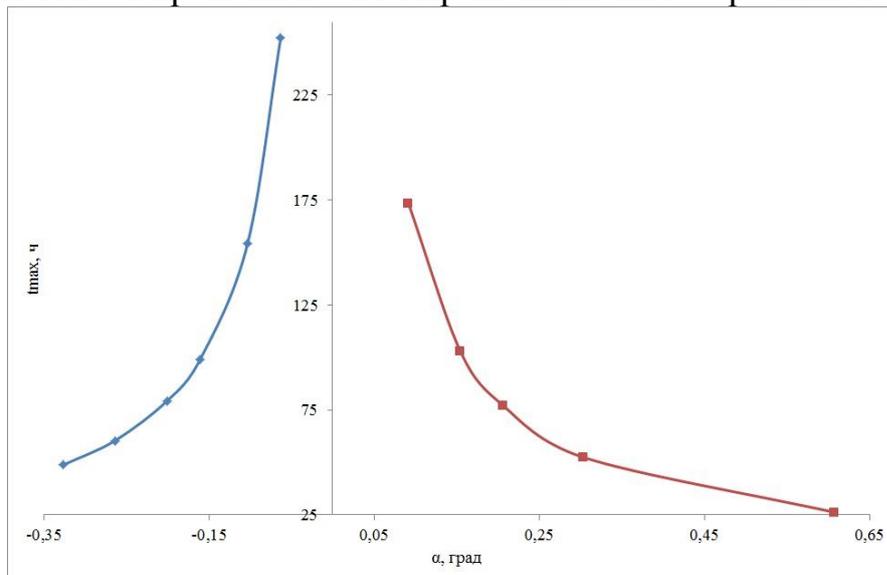


Рисунок 7 – График зависимости времени спада t_{max} от угла наклона аппроксимирующих прямых α .

Измеренные значения сетевой задержки рассматриваются как значения случайной величины в допустимых пределах. Поэтому выдвинута основная гипотеза H_0 , которая утверждает, что «распределение сетевой задержки является нормальным». Соответственно, сформулирована альтернативная гипотеза H_1 – «распределение задержки не является нормальным». Для подтверждения или опровержения основной гипотезы выполнена проверка соответствия типа распределения с помощью правила «трёх сигм» и критерия хи-квадрат для уровня значимости $\beta = 0,01$.

Как видно из таблицы 1, ни в одном рассчитанном случае не происходит превышения критического значения хи-квадрат и тройного среднего квадратического отклонения, что позволяет принять основную гипотезу H_0 .

Таблица 1 – Сводные данные обоснования типа распределения

Вариационный ряд	χ^{2+} расч.	χ^{2+} крит.	β расч.	Степень свободы	правило «трёх сигм»	
					$ \delta $	$3 \cdot S_{кв.}$
$T_{PPS}=0,999994$	3,033	9,21	0,21	2	0,215	0,317
$T_{PPS}=0,999995$	10,005	11,34	0,015	3	0,193	0,269
$T_{PPS}=0,999996$	2,512	16,812	0,86	6	0,164	0,221
$T_{PPS}=0,999997$	3,028	11,34	0,38	3	0,140	0,193
$T_{PPS}=0,999998$	4,163	13,28	0,38	4	0,114	0,156
$T_{PPS}=0,999999$	4,067	13,28	0,4	4	0,104	0,128
$T_{PPS}=1,0$	7,67	15,086	0,17	5	0,082	0,133
$T_{PPS}=1,000001$	0,988	11,34	0,8	3	0,103	0,150
$T_{PPS}=1,000002$	1,674	15,086	0,89	5	0,142	0,187
$T_{PPS}=1,000003$	3,67	11,34	0,29	3	0,166	0,223
$T_{PPS}=1,000005$	3,4705	11,34	0,32	3	0,254	0,317
$T_{PPS}=1,00001$	10,378	18,475	0,16	7	0,357	0,571

Расчёт доверительных интервалов для математического ожидания и для дисперсии позволил определить границы нахождения соответствующих параметров при выбранной доверительной вероятности. Результаты расчёта интервалов представлены в таблицах 4.11 и 4.12 диссертации.

4.2 Анализ результатов исследования режима работы инсёртера

В процессе эксперимента устройство замещения (инсёртер) было настроено на синхронизацию от внешнего стороннего источника сигнала 1 PPS, затем устройство было перезапущено путём физического отключения и повторной подачи напряжения на блок питания, а также отключения внешнего источника опорного сигнала. В этом случае на модуль замещения контента инсёртера сигнал 1PPS не поступает; устройство формирует аварийные сообщения об отсутствии возможности корректной работы фазовой автоподстройки частоты (рисунок Г.1), а также об отсутствии опорного сигнала. Далее происходит срыв синхронизации, что фиксируется в журнале событий аппаратного анализатора потока, к входу которого подключено устройство замещения согласно схеме рисунка 2.9 диссертации. Результирующая периодичность возникновения ошибок первого приоритета на выходе инсёртера, представленная на рисунке 4.11 диссертации, составила 11 секунд.

4.3 Анализ характера работы формирователя DVB-T2

Согласно программе эксперимента, было произведено исследование возможности работы модулятора ProTelevision PT-2000 в одночастотном режиме при различных типах временных штампов. Определение рабочих временных диапазонов сетевой задержки информационного потока, измеренной непосредственно до формирователя сигнала, необходимо для выявления причин неработоспособности оборудования при организации одночастотных сетей DVB-T2. Установленные в результате эксперимента интервалы входной сетевой задержки потока для передатчика представлены на диаграмме рисунка 8.

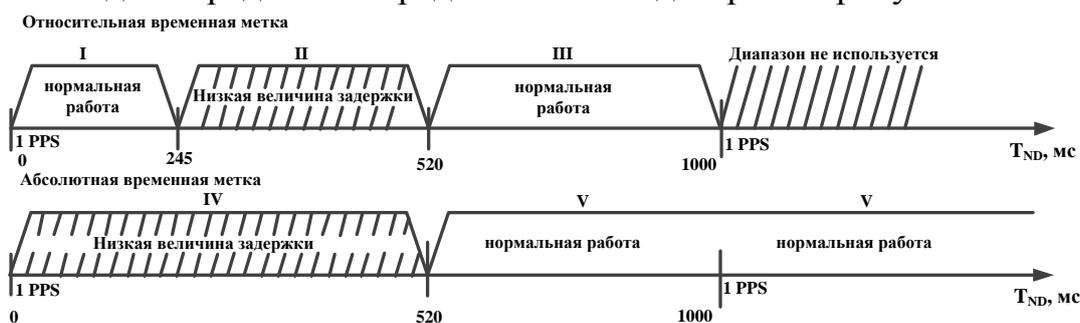


Рисунок 8 – Временная диаграмма работы формирователя PT-2000 в режиме одночастотной сети

Процент времени, занимаемый вторым (нерабочим) интервалом при относительной синхронизации составляет $T_{II} = 275 \cdot 100 / 999 = 27,53\%$.

Если PT-2000 работает в составе SFN с перекрытием зон обслуживания, то при возникновении нестабильности опорного сигнала на одной станции и некорректной оценке сетевой задержки, кроме нерабочего интервала II задержка достигнет величины, граничной с интервалом I и передающее устройство возобновит работу. Но, при этом если одна станция будет функционировать в интервале I, а другая – в интервале III, то приёма сигнала в зоне перекрытия не будет, поскольку один из передатчиков будет излучать в эфир сигнал со смещением времени, то есть с отставанием на 1 секунду. В этом случае, аварийная ситуация будет наблюдаться не только в течение длительности второго интервала (27,53% времени), но и первого, поэтому суммарная длительность неработоспособности передатчика за один цикл спада / нарастания составит 52,05 процента.

4.4 Обработка результатов исследования режима работы передающей станции с устройством регионализации

В результате моделирования участка одночастотной сети с использованием устройств вставки локального контента было подтверждено на практике и установлено, что при нахождении приёмника в точке перекрытия зон обслуживания передающих станций одночастотной сети возможность приёма сигнала DVB-T2 может рассматриваться как процесс отдельной демодуляции каждого канала физического уровня.

Вероятность условно безошибочной демодуляции всего потока T2-MI в целом будет определяться как результат конъюнкции вероятностей приёма каждого канала в отдельности:

$$P_{RX} = P_{RX}(PLP_0) \wedge P_{RX}(PLP_1) \wedge P_{RX}(PLP_N)$$

P_{RX} будет равна единице только в том случае, когда демодуляция всех PLP одновременно будет возможна и корректна, во всех остальных случаях отсутствие полноценной возможности приёма абонентским оборудованием сигнала DVB-T2 будет определяться как техническая остановка либо аварийная ситуация.

4.5 Расчёт показателей надёжности схемы формирования сигнала на типовой передающей станции

Результатами расчёта коэффициента готовности системы вещания на типовой передающей станции, согласно приведённой в п. 2.3. диссертации разработанной методике при интенсивностях отказов и восстановления, вычисленных на основании таблиц Е.1 – Е.4 приложения Е, являются:

- для системы вещания с инсёртером коэффициент готовности составил $K_{Г\Sigma} = (K_{ГA1} \cdot K_{ГB1} + K_{ГC1} \cdot K_{ГD1} - K_{ГA1} \cdot K_{ГB1} \cdot K_{ГC1} \cdot K_{ГD1}) \cdot K_{ГE1} \cdot K_{ГF1} = (0,9827 \cdot 0,9788 + 0,9827 \cdot 0,9788 - 0,9827 \cdot 0,9788 \cdot 0,9827 \cdot 0,9788) \cdot 0,8511 \cdot 0,8956 = 0,7612$;

- для системы вещания без регионализации $K_{Г'\Sigma} = K_{ГA1} \cdot K_{ГB1} \cdot K_{ГF1} = 0,9827 \cdot 0,9788 \cdot 0,8956 = 0,8614$;

- для системы с каскадной врезкой контента $K_{Г\Sigma}'' = K_{ГI1} \cdot K_{Г\Sigma} + K_{ГI1} \cdot K_{ГF1} \cdot K_{ГG1} \cdot K_{ГH1} - K_{ГG1} \cdot K_{ГH1} \cdot K_{Г\Sigma} \cdot K_{ГI1} = 0,892 \cdot 0,7612 + 0,892 \cdot 0,896 \cdot 0,9827 \cdot 0,9788 - 0,9827 \cdot 0,9788 \cdot 0,7612 \cdot 0,892 = 0,794$.

Для повышения надёжности системы с каскадной врезкой возможно использование в качестве крайнего метода поддержания работоспособности передающего устройства и недопущения аварии на оборудовании вещания дополнительного непосредственного соединения выхода приемного оборудования и входа передатчика. На графе рисунка 2.7 диссертации данное подключение показано в виде соединения блоков $U1'$ и $U2'$, отмеченных пунктирной линией, и блока $U6'$. Такое соединение может быть рассмотрено как параллельное относительно полноценной схемы с каскадной врезкой. Тогда:

$K_{Г\Sigma}''' = (K_{Г\Sigma} / K_{ГF1} + K_{ГA1} \cdot K_{ГB1} - (K_{Г\Sigma} / K_{ГF1}) K_{ГA1} \cdot K_{ГB1}) K_{ГF1} = (0,794 / 0,8956 + 0,9827 \times 0,9788 - (0,794 / 0,8956) 0,9827 \cdot 0,9788) 0,8956 = 0,8917$.

Коэффициент готовности системы с дополнительным резервированием на 9,77% выше, чем системы вещания с каскадной врезкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы и результаты работы в соответствие с поставленной целью по повышению стабильности и качества передачи цифрового изображения системы вещания DVB-T2 на передающей станции за счёт исследования причин и диагностики нарушения нормальной работы оборудования при функционировании в режиме SFN с использованием технологии модификации контента заключаются в следующем:

1. С помощью разработанной методики расчёта надёжности, отличающейся применением математического аппарата многослойных графов, определено, что система с каскадной врезкой контента имеет коэффициент готовности на 3,28% выше, чем схема с врезкой потока путем замещения каналов физического уровня,

при этом прямое резервирование каскадной схемы повышает её надёжность на 9,77 процента.

2. Определено, что длительность цикла спада сетевой задержки цифрового потока T2-MI уменьшается с ростом величины отклонения периода опорного сигнала синхронизации от номинального значения. С помощью любого известного статистического параметра задержки возможно определить длительность спада, а, следовательно, запас времени на устранение неисправности до момента достижения задержкой критической величины.

3. Экспериментально установлено, что нерабочий диапазон входной сетевой задержки для передатчика модели РТ-2000 составляет 27,53 процента в режиме относительной синхронизации. Необходимо также отметить, что если РТ-2000 работает в составе одночастотной сети с перекрытием зон обслуживания, то при нестабильности опорного сигнала на одной станции возникает ситуация, когда одна станция функционирует в первом рабочем интервале, а другая – в третьем. Тогда приём сигнала в зоне перекрытия не будет возможен, поскольку один из передатчиков будет излучать в эфир сигнал со смещением времени, то есть с отставанием на 1 секунду. В этом случае, аварийная ситуация будет наблюдаться не только в течение длительности второго интервала, то есть 27,54 процента времени, но и первого, поэтому суммарная длительность неработоспособности передатчика за один цикл спада / нарастания составит 52,05 процента. При отсутствии возможности оперативного устранения неисправности поддержка работоспособности передатчика возможна путём принудительного локального указания времени смещения опорного сигнала на каждой станции.

4. Установлено, что периодичность возникновения ошибок первого приоритета на выходе устройства вставки локального контента при отсутствии опорного сигнала синхронизации в зависимости от аппаратной реализации устройства составляет в среднем 11 секунд, что вызывает кратковременную периодическую остановку вещания. Для недопущения подобной ситуации необходимо резервирование источников синхронизации либо программный или аппаратный обход устройства модификации.

5. Предложена классификация основных неисправностей комплекса оборудования передающей станции на основе теории графов, которая позволяет рассчитать интенсивности отказов и восстановления для определения коэффициента готовности системы вещания.

6. Обосновано, что сетевая задержка цифрового потока T2-MI имеет нормальное распределение, что подтверждается с помощью расчёта статистики хи-квадрат и правила «трёх сигм». Расчёт доверительных интервалов позволяет определить параметры сетевой задержки на любом участке измерения.

7. Экспериментально подтверждена возможность надёжного приёма эфирного телевизионного сигнала в одночастотной зоне при различных вариантах конфигурации замещения контента. Вероятность декодирования всего информационного потока MultiPLP – есть конъюнкция вероятности декодирования каждого канала физического уровня в отдельности.

По результатам работы опубликованы 4 научные работы в изданиях,

рекомендованных ВАК к опубликованию основных научных результатов диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук, 6 работ в трудах отечественных и международных конференций. Результаты диссертационной работы используются в процессе настройки и текущей эксплуатации оборудования системы вещания DVB-T2 инженерно-техническим персоналом на предприятии ФГУП РТРС «Дальневосточный РЦ» Цех Хабаровск и в качестве учебного пособия для студентов и инженеров по направлению «Цифровое телевизионное вещание DVB-T2».

Таким образом, результаты диссертации направлены на повышение качества передачи цифровых изображений и помехоустойчивости работы системы DVB-T2 с технологией модификации контента, следовательно, работа соответствует п. 5 «Исследование и разработка новых телевизионных систем и устройств с целью повышения качества изображения и помехоустойчивости работы» паспорта специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Рекомендации.

1. При практической эксплуатации системы вещания с использованием передатчика модели РТ-2000 необходимо учитывать рабочие границы значений входной сетевой задержки в зависимости от используемого режима синхронизации.

2. Если система вещания на типовой передающей станции организована с применением технологии модификации контента, то использование дополнительного резервирования схемы позволяет повысить коэффициент готовности на 9,77 процента.

Перспективы дальнейшей разработки темы.

Дальнейшая разработка темы состоит в целесообразности определении номинальных параметров надёжности системы вещания с использованием устройства врезки контента, независимых от конкретных моделей применяемого оборудования, а также в универсализации всех полученных результатов относительно любых типов вещательных устройств сети DVB-T2.

ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях по списку ВАК

1. Кухарская, О.В. (Тиссен О.В.) Физический смысл синхронизации в одночастотных сетях цифрового ТВ вещания / О. В. Кухарская // Электросвязь. – 2016. – № 12. – С. 59-63.

2. Кухарская, О.В. (Тиссен О.В.) Физические особенности замещения информационного контента в цифровом потоке для DVB-T2 / О. В. Кухарская, Е. З. Савин // Успехи современной радиоэлектроники. – 2017. – № 6. – С. 55-63.

3. Кухарская, О.В. (Тиссен О.В.) Физический смысл применения сетевой задержки цифрового потока для DVB-T2 / О. В. Кухарская // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2018. – Т. 12. – № 6. – С. 18-23.

4. Кухарская, О.В. (Тиссен О.В.) Анализ влияния нестабильности сигнала синхронизации на замещение локального контента для DVB-T2 / О. В. Кухарская, Е. З. Савин // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. –

2018. – № 1. – С. 19-24.

Публикации в материалах конференций

1. Кухарская, О.В. (Тиссен О.В.) Технологии замещения информационного контента в потоке T2-MI / О.В. Кухарская, Е.З. Савин // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. ДВГУПС. – 2016. – Т. 1. – С. 141-144.

2. Кухарская, О.В. (Тиссен О.В.) Исследование устройств замещения локального контента / О. В. Кухарская // Технические науки. Теория и практика. Материалы III международной научно-практической конференции. Саратов. – 2017. – С. 56-63.

3. Кухарская, О.В. (Тиссен О.В.) Физический смысл использования меток PCR в цифровом потоке / О. В. Кухарская, Е.З. Савин // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. ДВГУПС. – 2017. – Т. 2. – С. 260-265.

4. Кухарская, О. В. (Тиссен О.В.) Методы оценки величины сетевой задержки цифрового потока для DVB-T2 / О. В. Кухарская, Е. З. Савин // Новые тенденции развития в управлении процессами перевозок, автоматике и инфокоммуникациях. ДВГУПС. – 2017. – С. 136-141.

5. Кухарская, О.В. (Тиссен О.В.) Определение показателей надёжности схемы вещания DVB-T2 / О. В. Кухарская // Материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники». СФУ. – 2018. – С. 3-7.

6. Тиссен, О. В. Технология регионализации контента в DVB-T2 / О. В. Тиссен // Материалы XXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях (НИТ-2018)». РГРТУ. – 2018. – Т. 1. – С. 110-111.