

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

**СИСТЕМЫ синхронизации,
формирования и обработки
сигналов**

№5-2025 год

Главный редактор

Пестряков Александр Валентинович,

*д.т.н., профессор, зав. кафедрой Радиооборудование и Схемотехника,
Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия*

Редколлегия:

Дмитриев Александр Сергеевич,

*д.ф.-м.н., профессор, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Москва, Россия*

Казаков Леонид Николаевич,

д.т.н., профессор, зав. кафедрой Радиотехнических систем, Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Ярославль, Россия

Карякин Владимир Леонидович,

*д.т.н., профессор, Поволжский государственный университет телекоммуникаций
и информатики, Самара, Россия*

Рыжков Анатолий Васильевич,

*д.т.н., главный научный сотрудник, профессор, Московский технический университет
связи и информатики, Москва, Россия*

Строганова Елена Петровна,

*д.т.н., профессор, Начальник Испытательной лаборатории средств связи и вещания,
Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия*

Учредитель:

ООО «ИД Медиа Пабlishер»

Номер подписан в печать 15.07.2025 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Косичкина Т.П., Подгорный А.А., Сенина А.С., Суханов А.М. ОСОБЕННОСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТЕЙ СОТОВОЙ СВЯЗИ ПРИ ПЕРЕХОДЕ К ПЯТОМУ ПОКОЛЕНИЮ	4
Данилов А.Н., Короткевич М.А., Максимов С.П. ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ В ИНТЕРНЕТЕ ВЕЩЕЙ	10
Романцов А.П., Минаева М.К. МОДЕЛИРОВАНИЕ КАСКАДНОЙ СХЕМЫ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ LDPC-КОДА	16
Микенин А.Э., Хачатрян Д.В., Красиков Д.А. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БЫТОВЫХ ИМПУЛЬСНЫХ БЛОКОВ ПИТАНИЯ В ТРАНЗИСТОРНЫХ УСИЛИТЕЛЯХ МОЩНОСТИ ЛАССА HI-FI	22
Ерастов А.Д., Тутова Н.В. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	29
Мамедов И.Р. НАЗЕМНОЕ FM РАДИОВЕЩАНИЕ В АЗЕРБАЙДЖАНЕ: ШИРИНА СПЕКТРА, ДЕВИАЦИЯ ЧАСТОТЫ, СИСТЕМА RDS	39
Свистунов В.Н. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВНЕДРЕНИЯ ГИБРИДНЫХ СТАНДАРТОВ ТЕЛЕВЕЩАНИЯ	46

ОСОБЕННОСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТЕЙ СОТОВОЙ СВЯЗИ ПРИ ПЕРЕХОДЕ К ПЯТОМУ ПОКОЛЕНИЮ

Косичкина Татьяна Павловна

МТУСИ, зав. кафедрой, к.т.н., доцент, Москва, Россия

t.p.kosichkina@mtuci.ru

Подгорный Александр Алексеевич

МТУСИ, студент группы МИТ2231, Москва, Россия

podgornalex@yandex.ru

Сенина Арина Сергеевна

МТУСИ, студент группы МИТ2401, Москва, Россия

arseniser202@gmail.com

Суханов Алексей Михайлович

МТУСИ, студент группы МИТ2231, Москва, Россия

remark19888@gmail.com

Аннотация

Работа посвящена исследованию особенностей планирования сетей мобильной связи нового поколения. Отмечается необходимость обеспечения непрерывного покрытия при переходе от одного поколения к другому. Рассматриваются способы достижения непрерывного покрытия. Анализируются изменения в расчетах бюджета радиолинии в соответствии с изменениями в стандарте.

Ключевые слова

Системы мобильной связи, радиочастотное планирование, бюджет радиолинии, сценарии развертывания, улучшение радиопокрытия.

Введение

Переход к пятому поколению мобильной связи (5G) является важным этапом в развитии телекоммуникационных технологий. Он ставит перед исследователями и разработчиками задачу создания новых эффективных методов проектирования и планирования таких систем. Сеть 5G призвана обеспечить высокую скорость, надежность и масштабируемость для удовлетворения потребностей современного общества.

Однако, несмотря на высокий уровень интереса и активное развитие данной области, существуют существенные ограничения, которые препятствуют достижению поставленных целей. Это создает важное противоречие: существует потребность в создании качественных методов планирования систем 5G на фоне недостаточной теоретической разработки в этой области.

Технологии 5G предъявляют новые требования к характеристикам систем, включая высокую плотность базовых станций, адаптацию к условиям среды и интеграцию с системами Интернета вещей (IoT). Сложность данных систем требует продуманных математических и инженерных решений.

Сети 5G по своей сути сложны, и их планирование требует более широкого научного охвата, чем традиционное проектирование сетей сотовой связи. Можно показать, что правильное планирование и проектирование приводят к существенному улучшению нескольких параметров производительности [1].

Отсутствие научной базы для решения задачи внедрения новых технологий обуславливает необходимость разработки новых методологий и подходов, которые адаптируются к изменяющимся условиям и позволяют раскрыть потенциал технологий нового радио (New Radio, NR) для удовлетворения потребностей пользователей.

Задачи планирования систем мобильной связи

Задачей планирования сотовых сетей связи были и продолжают оставаться повышение пропускной способности сети и скорости передачи данных для пользователей, а также эффективное использование частотного ресурса для операторов связи. С каждым новым поколением происходит усложнение сети, что может привести к проблемам развертывания, например, в расположении базовых станций, базе данных описания сети и позиционировании антенн. Это, в свою очередь, приводит ко многим непредсказуемым результатам

при функционировании сети, например, недостаточное покрытие может более часто запускать процедуру хэндовера.

При планировании сети сотовой радиосвязи первым и основным шагом, который предпринимает инженер по планированию является определение площади покрытия. На этом этапе, путем предварительной оценки, определяется необходимое количество сетевых элементов, которые могут покрыть рассматриваемую географическую область. Результатом этого шага является расчетное количество базовых станций, которые будут поддерживать объем трафика, генерируемого в этой области. Планирование сети в общем смысле является итеративным процессом проектирования, синтеза и реализации.

Процесс планирования системы сотовой связи четвертого поколения (4G), как правило, состоит из следующих основных шагов: анализ трафика, оценка покрытия, оценки пропускной способности (емкости соты), планирование физического идентификатора соты (PCI) и оценка пропускной способности транспортной сети [2]. Конечная цель планирования сети – предоставить сотовую сеть, которая соответствует требованиям пользователей.

При *анализе трафика* во время планирования инженеры оценивают объем трафика, который базовые станции могут обрабатывать в пиковые периоды (часы наибольшей нагрузки, ЧНН) и в обычное время. Этот анализ обычно основан на данных о пользовательском трафике наряду с другим типом трафика, таким как сигнализация. В настоящее время при планировании радиосети в первую очередь учитывается трафик восходящего соединения, поскольку качество обслуживания (Quality of Service, QoS) полностью зависит от сквозной доставки данных для каждого пользователя. Результаты анализа трафика учитываются при планировании покрытия и местоположение сайта.

Оценка покрытия определяет максимальную дальность распространения сигнала. На этом этапе необходимо выполнить энергетический расчет (расчет бюджета) радиолинии для одной соты, чтобы определить максимально допустимое расстояние мобильного абонента (UE) от базовой станции (eNB). В конечном итоге задача сводится к нахождению максимально допустимых потерь распространения (MAPL) между eNB и UE, как в нисходящей линии (downlink, DL), так и в восходящей линии (uplink, UL). Результатом этого этапа является рассчитанный радиус соты, который легко найти, зная максимально допустимые потери распространения и модель распространения.

Оценка емкости имеет решающее значение при определении размеров сети, поскольку она позволяет проектировщикам и инженерам по планированию удовлетворять требования по пропускной способности на границе соты. На этот этап планирования в значительной степени влияет ширина полосы пропускания системы. В технологии LTE-Advanced (LTE-A) используются стандартизированные значения полосы пропускания: 1,5, 3, 5, 10, 15 и 20 МГц.

Ширина полосы пропускания определяет количество ресурсных блоков (RB), доступных пользователям. Количество RB прямо пропорционально влияет на пропускную способность соты. Из-за высоких требований к скорости передачи со стороны пользователей как в UL, так и в DL, в технологии LTE-A начали использовать агрегацию, то есть объединение, нескольких несущих частот. Это позволило увеличить общую пропускную способность сети, хоть и несколько увеличило сложность оборудования [3]. Перечисленные принципы планирования позволяют получить представление о том, какие изменения ожидаются при планировании сетей 5G.

Архитектура системы и сценарии развертывания

Перечень отступлений от традиционных подходов к планированию начнем с рассмотрения архитектуры системы. Для 5G определены два варианта архитектур (рис. 1): неавтономная и автономная [4].

В неавтономной архитектуре (Non-Stand Alone, NSA) сеть радиодоступа 5G (AN) и ее интерфейс NR используются в сочетании с существующей инфраструктурой LTE (radio access network, RAN) и ядром сети (evolved packet core, EPC), что делает технологию 5G доступной пользователям без замены всей сети. В этой конфигурации поддерживаются только услуги 4G, но при этом обеспечиваются некоторые характеристики 5G (высокая пропускная способность, меньшая задержка и т.д.). Архитектура NSA также известна как «двойное подключение E-UTRA-NR» или «вариант архитектуры 3 (опцион 3)».

Двойное подключение подразумевает, что UE подключено к двум сотам одновременно, отдельно получая сигналы от LTE и от 5G, а затем объединяя потоки. Устройство может одновременно подключаться к нескольким узлам в пределах RAN, как к главному узлу LTE, так и к вторичному узлу NR. Основная сота на основе LTE отвечает за плоскость управления и сигнализацию плоскости пользователя, в то время как вторичная сота на основе NR обрабатывает только данные плоскости пользователя, существенно увеличивая скорость передачи данных [5].

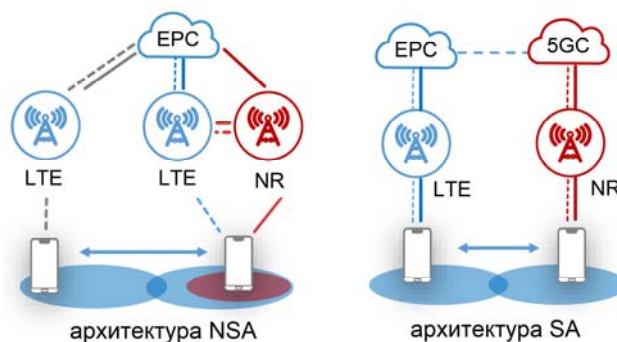


Рис. 1. Неавтономная и автономная архитектуры 5G

Внедрение 5G с опцией NSA является самым быстрым, простым и дешевым способом для операторов немедленно начать предоставлять услуги 5G пользователям. Если мобильный абонент входит в зону обслуживания базовой станции 5G (gNB), его устройство переключается на обслуживание этой базовой станцией, при этом возможно увеличение его скорости передачи.

Автономная архитектура (Stand-Alone, SA) может рассматриваться как полное развертывание 5G, не требующее для своей работы какой-либо части сети 4G. Только в этой конфигурации поддерживается полный набор услуг 5G.

При переходе от одного поколения к другому важно поддерживать непрерывность обслуживания. Поскольку частотные диапазоны, используемые в 5G по большей части выше, чем в 4G, то при прочих равных условиях расчетный радиус зоны обслуживания для NR будет меньше. Это означает, что если для размещения базовых станций будет использована та же инфраструктура, то даже если зоны обслуживания 4G спланированы с перекрытием, при переходе к 5G в покрытии будут образовываться «дыры». Поэтому при развертывании сети с применением архитектуры NSA рекомендуется устанавливать дополнительные базовые станции для поглощения трафика в хот-спотах.

Различные размеры сот способствуют реализации главной цели следующего поколения мобильной связи – ориентированную на услуги сеть, поскольку макросоты используются в качестве опорных точек и обеспечивают широкополосное покрытие, в то время как малые соты обеспечивают покрытие с высокой пропускной способностью в пределах покрытия макросоты.

Покрытие является одним из ключевых факторов, которые оператор учитывает при коммерциализации сетей сотовой связи, из-за его прямого влияния на качество обслуживания, а также на капитальные затраты (CAPEX) [6]. Если в системах 5G NR с автономной архитектурой не обеспечивается такое же непрерывное покрытие, как у устаревшей сети LTE, то при перемещении UE в/из зоны покрытия NR это приведет к частому межсистемному переключению (хэндоверу) между технологиями радиодоступа (radio access technology, RAT) 4G и 5G, что приведет к ухудшению пользовательского опыта.

Таким образом характеристики покрытия NR влияют на выбор архитектуры NSA и SA. Поэтому при планировании крайне важно всесторонне оценить покрытие 5G NR, сравнив его с покрытием LTE. После полного развертывания ядра сети 5G параметры NSA/SA могут быть перенастроены в соответствии с покрытием сети, типом UE, сервисами и т.п.

Особенности физического уровня 5G

В данном разделе рассматриваются особенности физического уровня 5G, так или иначе оказывающие влияние на расчет радиопокрытия. Технология 5G во многом повторяет способы передачи информации, которые использовались в сетях 4G LTE с учетом необходимого масштабирования, а также изменений, определяемых переходом в миллиметровый диапазон [7].

Основные изменения спецификации физического уровня сетей 5G коснулись методов модуляции, структуры кадра, методов передачи и приема в восходящем и нисходящем каналах, а также увеличения числа антенн и принципов формирования луча в многоантенных системах.

В первом приближении при расчете радиопокрытия предполагается, что сеть имеет регулярную однородную структуру, т.е. состоит из сот одинакового размера (радиуса) в которой все базовые станции имеют одинаковую диаграмму направленности передающих антенн и одинаковые эффективные излучаемые мощности, эффективные высоты передающих и приемных антенн, поляризацию и условия распространения радиоволн.

Площадь покрытия одного сайта определяется эффективным радиусом соты, который вычисляется в соответствии с моделью распространения радиоволн и допустимыми максимальными потерями распространения.

Таким образом, на покрытие в первую очередь влияют используемые для расчета модели распространения, выбор которых представляет отдельное самостоятельное исследование.

В свою очередь, изменения в радиоинтерфейсе 5G отразились на расчете максимально допустимых потерь распространения. Максимально допустимые потери (L_{max}) рассчитываются исходя из мощности передатчика и чувствительности приемника. Расчет производится отдельно для нисходящей и восходящей линий связи.

Для сети 4G максимально допустимые потери распространения в нисходящем канале могут быть рассчитаны по формуле [2]:

$$L_{max} = EIPR_{SC} - P_{min} - L_P - M_{SF},$$

где: L_{max} – максимально допустимые потери распространения (дБ); $EIPR_{SC}$ – эффективная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) на поднесущую (дБм); P_{min} – минимальная принимаемая мощность (дБм); L_P – потери проникновения (дБ); M_{SF} – допуск на затенения (дБ).

Эффективная изотропно излучаемая мощность на поднесущую определяется следующим образом [2]:

$$EIPR_{SC} = P_{sc} + G_{Tx} - L_C - L_B,$$

где: P_{sc} – мощность на поднесущую (дБм); G_{Tx} – коэффициент усиления передающей антенны (дБи); L_{CTx} – потери в передающем кабеле (дБ); L_{BTx} – потери в человеческом теле (дБ).

Мощность на поднесущую можно определить как [2]:

$$P_{sc} = P_{tot_max} 10 \log(n),$$

где: P_{tot_max} – максимальная общая излучаемая мощность (дБм); n – число поднесущих, по которым распределена энергия сигнала.

В технологии LTE значение n в нисходящей линии – это число ресурсных блоков на выделенную полосу частот, умноженное на 12 (число поднесущих в ресурсном блоке). В восходящей линии количество поднесущих для распределения мощности в восходящей линии связи связано с количеством выделенных RB для UE. Эта величина, как правило, является результатом моделирования.

При переходе к расчетам сетей 5G при определении числа ресурсных блоков следует учитывать следующие изменения на радиоинтерфейсе: множественные нумерологии и применение агрегации несущих.

В зависимости от частоты, размера соты и характеристик задержки данного приложения или услуги в 5G может быть множество конфигураций нумерологии (параметров сигнала). Но в целом нумерологии строятся на основе интервала поднесущих 15 кГц, что обеспечивает идентичные сетки частотно-временных ресурсов для NR и LTE и является одним из основных инструментов для сосуществования этих систем и неизменности принципов их расчета.

Однако в расчет бюджета следует ввести параметр, учитывающий агрегацию несущих частот, поскольку при использовании данной технологии полоса пропускания сможет достигать 800 МГц. Несмотря на то, что здесь напрашивается тривиальный вывод, что увеличение полосы пропускания при агрегации несущихкратно увеличивает пропускную способность системы, на деле не все обстоит так просто. Как показывают исследования, например [8], при фрагментации спектра из-за воздействия большого количества помех по соседнему каналу эффективность агрегации может существенно снижаться.

Кроме того, использование количества агрегированных несущих может изменяться во времени, в зависимости от наличия или отсутствия свободных частотных ресурсов. Поэтому, как и в случае определения числа ресурсных блоков в восходящем канале, здесь рекомендуется воспользоваться результатами моделирования.

Наконец, минимальная принимаемая мощность вычисляется по формуле [2]:

$$P_{min} = P_{np_min} - G_{Rx} + L_{CRx} + L_{BRx} + M_I,$$

где: P_{np_min} – чувствительность приемника (дБм); G_{Rx} – коэффициент усиления приемной антенны (дБи); L_{CRx} – потери в принимающем кабеле (дБ); L_{BRx} – потери в человеческом теле (дБ); M_I – допуск на интерференцию (дБ).

Чувствительность приемника здесь – минимальный уровень входного сигнала, при котором обеспечивается требуемое минимальное значение отношения сигнал-шум плюс интерференция (SINR(дБ)):

$$P_{np, \min} = K_{ш} + 10 \lg(kT_0 f_{ш}) + SINR,$$

где $K_{ш}$ – коэффициент шума приемника (дБ); k – постоянная Больцмана; $f_{ш}$ (эффективная спектральная полоса канала) при нормальной температуре T_0 , К.

В технологии LTE за эффективную спектральную полосу канала, принимают расстояние между поднесущими (кГц), т.е. 15 кГц. При переходе к 5G в данном расчете также следует учитывать различные нумерологии.

Улучшение покрытия

С-диапазон является основным диапазоном для сети 5G и имеет большую пропускную способность. Однако в С-диапазоне покрытие нисходящей линии связи значительно лучше, чем покрытие восходящей линии связи из-за большой мощности передачи нисходящей линии связи gNB и диспропорции в распределении временных интервалов восходящей и нисходящей линии связи NR.

Применение таких технологий, как формирование луча и опорный сигнал, специфичный для соты (CRS), снижает помехи нисходящей линии связи и еще больше увеличивает разницу между покрытием восходящей и нисходящей линии связи С-диапазона.

Если взять в качестве примера нисходящий канал со скоростью передачи 50 Мбит/с и восходящий канал со скоростью 5 Мбит/с, то уровни мощности восходящего и нисходящего каналов в С-диапазоне будут отличаться на 16,2 дБ [9].

Massive MIMO может улучшить как покрытие, так и емкость и является ключевым техническим решением для сети 5G. Но развертывание Massive MIMO требует трех соображений, включая требования к производительности, требования к установке и экономии совокупной стоимости владения.

На начальном этапе 5G, с точки зрения максимизации покрытия и емкости, рекомендуется, чтобы 5G и 4G развертывались на одной площадке, чтобы обеспечить непрерывное покрытие и сократить расходы на инфраструктуру, планирование и оптимизацию.

Для учета в расчетах так называемого «усиления MIMO» (MIMO Gain) можно использовать экспериментальные данные [10].

При использовании MIMO нисходящий канал в С-диапазоне может достичь аналогичного покрытия, как LTE 1800 МГц, но есть ограничение в покрытии восходящего канала, что является узким местом развертывания 5G, влияющим на пользовательский опыт.

В 3GPP Release 15 [4] представлены два механизма для обработки ограниченного покрытия восходящего канала в более высоких диапазонах, а именно агрегация несущих NR и дополнительный восходящий канал (SUL).

На основе SUL функция Uplink and Downlink Decoupling определяет новые парные спектры, при этом С-диапазон используется для нисходящего канала, а диапазон ниже 3 ГГц (например, 1,8 ГГц) для восходящего канала, тем самым улучшается покрытие восходящего канала.

Учитывая сказанное, бюджеты линий связи TD-LTE и 5G NR рассчитываются и сравниваются на основе предположений, приведенных в [11]. Чтобы получить полный радиус соты, рассчитывается радиус покрытия физического широковещательного канала (PBCH), физического выделенного канала управления (PDCCH), физического канала случайного доступа (PRACH), физического нисходящего общего канала (PDSCH) и физического восходящего общего канала (PUSCH). Для расчета покрытия PUSCH предполагается типичный случай скорости передачи данных 128 кбит/с.

Заключение

В диапазоне более высоких частот, выделенных для сети 5G NR, для соответствия всем ключевым показателям эффективности (например, 99,99% доступности, 99,99% надежности, наивысшей скорости передачи данных и т.д.) повышаются требования к покрытию сети.

При этом пропускная способность сети может значительно ухудшиться из-за неточной оценки покрытия. Возможны два крайних случая:

- недооценка покрытия, которая может привести к перекрытию зон обслуживания соседних сот, что увеличит внутрисистемные помехи;
- переоценка покрытия, которая может привести к тому, что уровень принимаемого сигнала будет ниже требуемого порогового значения на границе соты.

Поэтому точное планирование радиочастотного покрытия в сетях пятого поколения будет ключевым приоритетом для операторов мобильной связи.

Рассмотренные в работе особенности планирования сети 5G, включая анализ изменений в расчетах бюджета канала, позволяют сделать следующие выводы.

Для более быстрого развертывания сети 5G необходимо преодолеть такую проблему, как обеспечение непрерывного покрытия. Эту проблему можно решить с помощью выбора соответствующей архитектуры (например, устанавливать дополнительные базовые станции для поглощения трафика в местах плотного скопления пользователей), или применения одной из технологий, рекомендуемых стандартом [4], а именно: massive MIMO, агрегация несущих или дополнительный восходящий канал.

Литература

1. *Larsson Christofer*. 5G Networks: Planning, Design and Optimization. Великобритания, Academic Press, 2018.
2. Long Term Evolution (LTE) Radio Access Network Planning Guide, Huawei Technology, 2011.
3. *Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Высочин В.П.* Агрегация спектра при формировании частотных каналов в сетях LTE Advanced // Электросвязь. 2010. № 9. С. 42-46.
4. 3GPP TR 21.915 V15.0.0 (2019-09) Technical Report. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 15 Description; Summary of Rel-15 Work Items (Release 15).
5. *Dahlman E., Parkvall S., Skold J.* 5G NR: The next generation wireless access technology. Academic Press, 2018.
6. *Liu G., Huang Y., Chen Z., Liu L., Wang Q., Li N.* 5G Deployment: Standalone vs. Non-Standalone from the Operator Perspective // IEEE Communications Magazine, vol. 58, no. 11, pp. 83-89, November 2020.
7. *Лемешко Н.В., Захарова С.С.* Частотное планирование сетей 5G в Российской Федерации и обеспечение их электромагнитной совместимости с другими радиотехнологиями // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2022. № 2(34). С. 191-199.
8. *Alotaibi Mohammed Awaidh*. Exploring Spectrum Aggregation Technology: A Study of the Technical, Techno-economic, Policy Implications and the Potential Impact on Spectrum Economics. 2016. Dissertations.
9. 5G Implementation Guidelines: NSA Option 3. [Электронный ресурс], February 2020 URL: https://www.gsma.com/solutions-and-impact/technologies/networks/gsma_resources/5g-implementation-guidelines-nsa-option-3/ (дата обращения 25.01.2025).
10. *Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю.* Технологии в системах радиосвязи на пути к 5G. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 280 с.
11. 3GPP RP-191527, Link Budget Template SRIT.

ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ В ИНТЕРНЕТЕ ВЕЩЕЙ

Данилов Алексей Николаевич

Московский Технический Университет Связи и Информатики (МТУСИ), доцент, к.т.н., Москва, Россия
alexnicdaniilov@yandex.ru

Короткевич Максим Александрович

Московский Технический Университет Связи и Информатики (МТУСИ), Москва, Россия
mkorotkevich25@gmail.com

Максимов Сергей Петрович

Московский Технический Университет Связи и Информатики (МТУСИ), старший преподаватель, Москва, Россия
maximovsp@gmail.com

Аннотация

Беспроводные сенсорные сети (WSN) характеризуются низким уровнем вычислительных ресурсов и энергопотребления. Традиционные криптографические подходы оказываются недостаточно эффективными в таких условиях из-за высокой сложности алгоритмов и значительного энергопотребления. Предложенный гибридный алгоритм безопасности (LSA), сочетающий протоколы Secure IoT (SIT) и Security Protocols for Sensor Networks (SPINS) обеспечивает защиту данных при минимальном уровне энергозатрат и умеренной вычислительной мощности.

Ключевые слова

Беспроводные сенсорные сети (WSN), гибридные алгоритмы, защита данных, энергоэффективность, безопасность сети.

Введение

В эпоху быстрого технологического прогресса – интернет вещей (IoT) стал технологией, соединяющих миллиарды устройств для обеспечения беспрепятственного обмена данными и автоматизации. В основе IoT лежат беспроводные сенсорные сети (WSN), которые служат критически важными инструментами для сбора, мониторинга и передачи конфиденциальной информации [1].

Однако широкое распространение создает проблемы безопасности. Данные, которые передаются через эти сети подвержены перехвату, манипуляциям и несанкционированному доступу. Злоумышленники используют уязвимости WSN, такие как - ограниченная вычислительная мощность и энергетические. Учитывая эти проблемы, обеспечение безопасности в WSN выходит на первый план.

В этой работе исследуется новый алгоритм безопасности LSA, предназначенный для удовлетворения требований безопасности WSN в IoT. Интегрируя ключевые особенности существующих методов шифрования – SPINS для аутентификации пользователей и SIT для эффективного управления ключами получаем алгоритм, который направлен на защиту передачи данных при минимизации энергопотребления и вычислительной сложности.

Результаты исследования

Открытый и беспроводной характер WSN подвергает их различным угрозам безопасности. Несанкционированный доступ является серьезной проблемой, поскольку злоумышленники могут использовать слабые механизмы аутентификации и перехватить данные. Отсутствие контроля над передачей данных увеличивает риск нарушений конфиденциальности. Помимо того, что данные можно перехватить, их можно поменять или повредить, что поставит под угрозу систему принятия решений [2].

Учитывая все ограничения и спектр угроз, перспективным решением стали облегченные криптографические алгоритмы. Они направлены на то, чтобы сбалансировать потребление энергии и надежность сети. Облегченное шифрование обеспечивает эффективность мер безопасности, минимизируя энергопотребление и вычислительные затраты, при этом гарантируя целостность и конфиденциальность данных. Кроме того, такие алгоритмы должны хорошо адаптироваться к потенциально новым киберугрозам без потери производительности [3].

В результате исследований были предложены различные методы защиты данных, но эти методы часто оказываются неэффективными из-за таких факторов, как высокая вычислительная сложность, значительное

энергопотребление и недостаточная устойчивость к продвинутым атакам [4]. Анализ этих подходов помогает выявить как успехи, так и недостатки, которые могут послужить основой для дальнейших улучшений.

В международных исследованиях большое внимание уделяется разработке блочных шифров, подходящих для устройств с ограниченными вычислительными возможностями [5, 6]. Например, Guo и его коллеги предложили алгоритм LED, который сочетает в себе элементы AES и PRESENT (рис. 1) [7]. Этот шифр разработан для обеспечения надежной защиты данных при минимальных затратах вычислительных ресурсов. Однако, несмотря на его энергоэффективность, дальнейшее использование алгоритма в WSN затруднено из-за значительного энергопотребления устройств на батарейках.

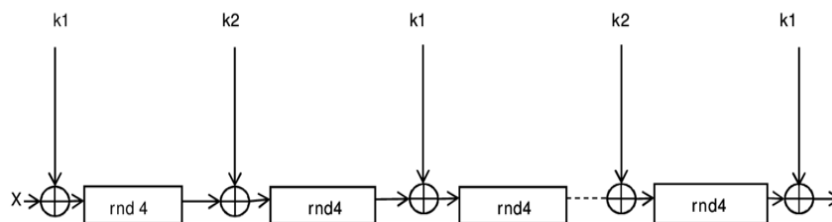


Рис. 1. Схема Led Block Cipher: rnd4 – раундовая функция, включающая замену, перестановку и XOR; k1, k2 – ключи шифрования, используемые на каждом этапе

Другим примером является алгоритм Secure Force (SF), предложенный Эбрахимом и Чонгом [8]. Этот подход минимизирует вычислительную сложность за счет использования базовых логических операций, таких как AND, OR, XOR и XNOR, что делает его особенно подходящим для энергоэффективных сетей. Однако SF недостаточно устойчив к сложным атакам, что ограничивает его использование в динамичных и изменяющихся сетевых условиях.

В российской научной литературе исследователи уделяют особое внимание использованию асимметричных криптографических алгоритмов для повышения безопасности сетей Интернета вещей [9]. Такие алгоритмы, как TLS/SSL, MQTT с шифрованием и CoAP с DTLS, активно используются для защиты данных при передаче, а также для аутентификации устройств и управления ключами.

Преимущество использования асимметричных алгоритмов заключается в том, что они не требуют безопасного обмена ключами, что является общим требованием для симметричных алгоритмов. Однако их высокая вычислительная сложность остается серьезной проблемой для устройств Интернета вещей с низким энергопотреблением. Чтобы преодолеть эту проблему, можно использовать аппаратные ускорители для криптографических операций, что делает возможным их практическое применение даже в условиях ограниченных ресурсов.

Значительное внимание уделяется разработке методов постквантовой криптографии, устойчивых к атакам со стороны квантовых компьютеров. Эти методы, основанные на решетках, полиномах и кодах с исправлением ошибок, являются перспективными в качестве решений для защиты данных в будущем. Однако текущие исследования указывают на их сложность в реализации и высокое энергопотребление, что ограничивает их использование в устройствах Интернета вещей. Тем не менее, эти постквантовые технологии обладают значительным потенциалом для обеспечения долгосрочной безопасности.

Анализ существующих подходов показывает, что ни один из них не решает в полной мере проблемы систем жизнеобеспечения в условиях ограниченных ресурсов. Большинство современных методов не обладают достаточной энергоэффективностью или обеспечивают недостаточную безопасность.

Для решения проблем, связанных с безопасностью, предлагается алгоритм безопасности LSA. Он объединяет функции протокола безопасности SPINS и методов шифрования SIT и направлен на повышение безопасности данных при минимизации вычислительных ресурсов, энергопотребления и уязвимости к атакам. Он состоит из трех ключевых этапов, расширение ключей, управление ключами и процесс шифрования, которые мы подробно разберем ниже.

1) Этап 1 – расширение ключа (см. рис. 2).

Это – процесс генерации нескольких ключей из одного входного ключа для обеспечения безопасного шифрования. Алгоритм использует 64 – битный блочный шифр с 64-разрядным ключом ввода, логические операции (XOR, XNOR), транспонирование Q-таблицы, перестановка P-таблицы и сдвиг влево.

Q-таблицы – это таблицы транспозиции, применяемые для усложнения шифрования путем изменения порядка битов данных.

P-таблицы – это таблицы перестановок, обеспечивающие диффузию (распределение влияния каждого бита на результат шифрования).

S-боксы – это таблицы замены, которые создают нелинейность, необходимую для защиты от линейного криптоанализа.

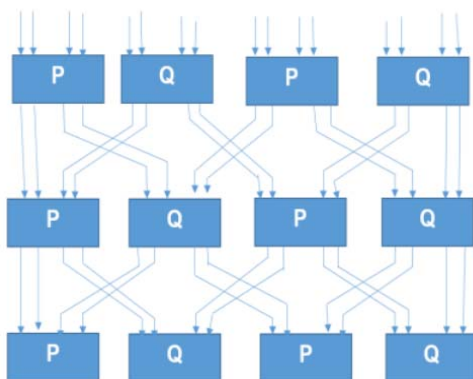


Рис. 2. SIT f-функция

На данном этапе выполняется следующее:

- 64-битный ключ ввода разделен на четыре 16-ти битных сегмента;
- каждый сегмент подвергается первоначальной замене с использованием S-боксов, полученных из метода шифровая SIT, генерируя промежуточные значения для дальнейшей проработки;
- замещенные значения передаются через математические функции, включая перестановки P-таблицы и транспозиция Q-таблицы, для повышения сложности ключа;
- логические операции XOR применяются к полученным значениям для создания пяти разных ключей. Эти ключи используются последовательно в процессе шифрования для обеспечения надежности безопасности.

Итого, этот этап гарантирует, что не производятся слабые ключи.

2) Этап 2 – управление ключами.

Этот этап гарантирует, что сгенерированные ключи аутентифицируются и проверяются перед использованием в шифровании. Он объединяет SPINS для проверки ключей, аутентификации пользователей и мониторинга энергетического состояния сети, который позволяет предотвратить полную разрядку узлов и обеспечить устойчивую работу WSN, даже при высоких нагрузках.

Этап 2 включает в себя следующее:

- Аутентификация и проверка:
 - SPINS использует комбинацию ключей шифрования и кодов аутентификации сообщений (MAC) для целостности и подлинности;
 - каждый ключ проходит проверку, чтобы понять и убедиться, что он не был скомпрометирован или подвержен потенциальным атакам.
- Проверка энергоэффективности:
 - перед передачей данных оцениваются уровни энергии сети – суммарный заряд батарей всех узлов WSN;
 - если энергии недостаточно, передача пакетов останавливается, чтобы предотвратить потерю данных.
- Динамическое использование ключа заключается в том, что для каждого раунда шифрования используются разные ключи, что гарантирует, что криптографический процесс остается надежным и снижает риск атак.
- Интеграция счетчиков:
 - для предотвращения атак – счетчик встроен в процесс шифрования;
 - каждая передача использует уникальное значение счетчика, обеспечивая актуальность и предотвращая повторное использование пакетов данных.

Этот этап добавляет уровень безопасности, гарантируя что только аутентифицированные пользователи и проверенные ключи могут участвовать в процессе шифрования.

3) Этап – 3. Процесс шифрования (рис. 3).

Процесс преобразует данные открытого текста в зашифрованный текст с использованием сгенерированных ранее ключей и логических операций. LSA сокращает количество раундов до 5, сводя к минимуму вычислительную сложность и потребление энергии.

Этап 3 включает в себя следующее:

- Входная сегментация, которая заключается в том, что 64 – битный простой текст разделен на четыре 16-ти битных подблок, помеченных как P1, P2, P3, P4.

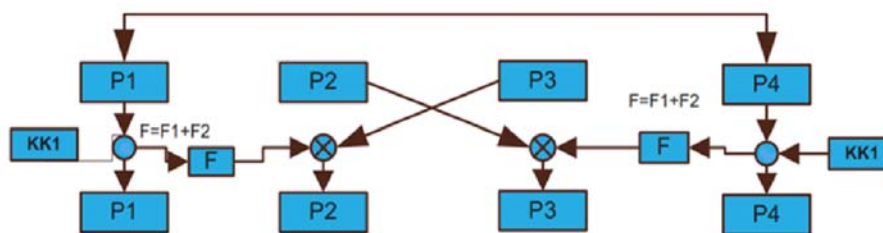


Рис. 3. Один раунд шифрования алгоритма (P1, P2, P3, P4 – сегменты входного текста, каждый длиной 16 бит, подвергаемые шифрованию с использованием уникальных ключей)

- Логические операции включают в себя: операции подстановки, перестановки и XOR, которые применяются к подблокам. Эти операции используют проверенные ключи из фазы - 2 (управление ключами). Например, P1 проходит XOR с первым ключом (KK1, например), и дает промежуточный результат, который подается в S-блок (на рисунке – F – центральная нелинейная функция вычисляет промежуточные результаты, повышая сложность и диффузию шифрования) для замены. Это обеспечивает нелинейное преобразование, увеличивая криптографическую сложность.
- Механизм переключения, который заключается в том, чтобы максимально сбить с толку злоумышленников, подблоки заменяют местами в процессе. Например, результаты из P2 и P3 обмениваются местами после первого раунда, и процесс продолжается для других блоков.
- Планирование ключей, при котором в каждом раунде используется уникальный ключ, созданный на первом этапе. Значит, если захватить один ключ, остальная часть процесса шифрования останется безопасной.
- Выход, при котором после всех раундов создается зашифрованный текст. Уменьшенное количество раундов обеспечивает более низкие требования к вычислениям при сохранении высокой безопасности.

Преимущества LSA:

- 1) Уменьшенное время расширения ключа, т.е. алгоритм быстрее генерирует ключи, чем сопоставимые методы, типа SPN и Feistel, сводя к минимуму окно для использования злоумышленниками.
- 2) Энергоэффективность, т.е. ограничивая процесс шифрования 5-ю раундами, LSA потребляет значительно меньше энергии, что делает его максимально пригодным для WSN в IoT.
- 3) Улучшенная безопасность, т.е. интеграция SPINS и SIT обеспечивает надежную аутентификацию пользователей, целостность и конфиденциальность.
- 4) Высокий коэффициент доставки пакетов – от 90 до 99%.

С помощью пакета программ MATLAB, были проведены несколько экспериментов, в которых использовалось 100 датчиков со случайным расположением на площади 400 м²:

- 1) Время расширения ключа (рис. 4).

Ключи были сгенерированы в диапазоне от 8 до 256 бит. Для каждой длины ключа процесс был выполнен 10 раз.

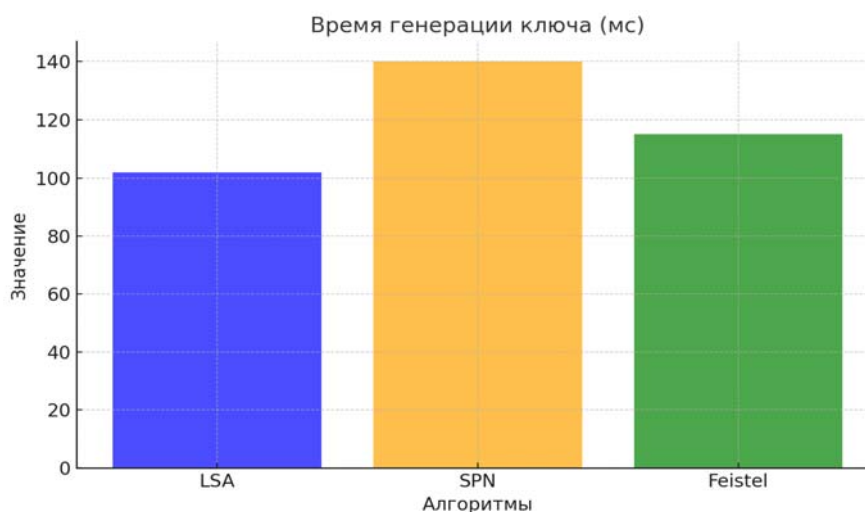


Рис. 4. Сравнение времени генерации ключа

Для 8-ми битного ключа потребовалось: 50 мс - LSA, 75 мс – SPN и 65 мс – Feistel.

Для 256 битного потребовалось: 102 мс - LSA, 140 мс – SPN и 115 мс – Feistel.

2) Энергопотребление (рис. 5).

Общая потребляемая энергия была рассчитана на 10 прогонов моделирования с различным количеством узлов. В течение всех 10 попыток LSA в среднем потребляла 411,2 мкДж. В то время как SPN – 781,6 мкДж, а Feistel - 795,3 мкДж. Такие результаты связаны с оптимизированным пятираундовым процессом шифрования LSA и механизмом проверки энергии.

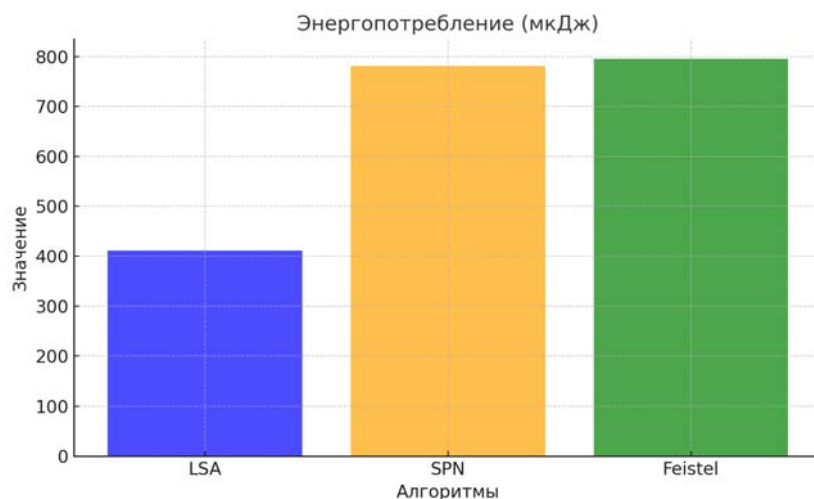


Рис. 5. Сравнение энергопотребления

3) Уровень безопасности (рис. 6).

Оценивалось путем тестирования вероятности успешного прогнозирования ключа или компрометации в течении 10 прогонов моделирования для каждой длины ключа от 8 до 256 бит.

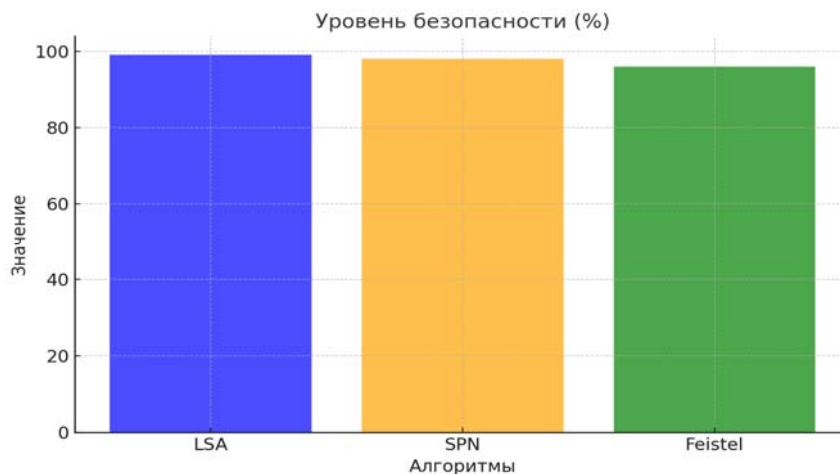


Рис. 6. Сравнение уровня безопасности

LSA показал уровень около 97-99%, опередив SPN – 96-98% и Feistel – 94-96%.

Динамическое использование ключей в LSA и аутентификацию пользователей на основе SPINS обеспечила улучшенную защиту от атак.

1) Коэффициент доставки пакетов (рис. 7).

Рассчитывалось как отношение успешно доставленных к общему количеству переданных пакетов.

Было 10 прогонов с различными конфигурациями (10, 50 и 100 узлов).

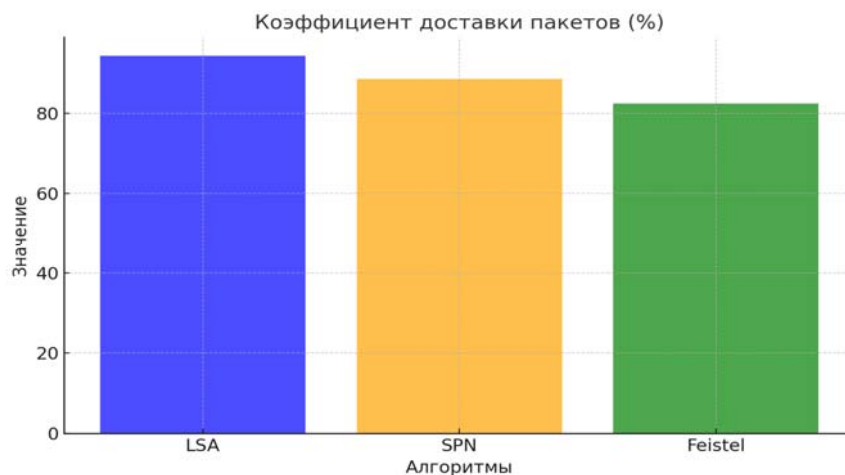


Рис. 7. Сравнение доставки пакетов

LSA поддерживала результаты на уровне 90-99% со средним 94,4%. В свою очередь SPN и Feistel – 88,6 и 82,5% соответственно.

Заключение

В этом исследовании представлен алгоритм безопасности LSA, который адаптирован к конкретным проблемам WSN в IoT. Основная цель заключалась в том, чтобы, проанализировав текущие решения, представить алгоритм с меньшим энергопотреблением и увеличенной защитой данных. Результаты показали, что LSA эффективно достигает этой цели. Интегрируя методы шифрования SPINS и SIT, предложенный алгоритм обеспечивает динамическое управление ключами, надежную аутентификацию и минимальные вычислительные методы. Было достигнуто снижение вычислительной сложности, более низкое потребление энергии, повышенная безопасность и улучшенная доставка пакетов, что делает его самым эффективным среди рассматриваемых.

LSA эффективно решает задачу балансировки безопасности с теми ресурсами, которые есть у WSN. Тем самым преодолевая основные ограничения существующих алгоритмов. Обеспечивает практичное, масштабируемое решение для WSN в IoT. Гибкость и производительность алгоритма позиционирует его как надежную структуру для удовлетворения меняющихся потребностей безопасности IoT.

Литература

1. *Smith J.* Securing IoT Devices: A Comprehensive Guide». Wiley, 2019. 350 p.
2. *Johnson R.* Cryptographic Algorithms for IoT Security. Springer. 2020. 420 p.
3. *Garcia M., Nguyen T.* Practical Applications of TLS/SSL in IoT Networks // IEEE Transactions on Secure Computing. 2018. P. 45-60.
4. *Brown A.* Advanced Topics in Quantum Cryptography. Cambridge University Press. 2017. 280 p.
5. *Chen L., Wang Q.* Post-Quantum Cryptography: State-of-the-Art and Future Perspectives. ACM Computing Surveys. 2019. P. 112-145.
6. *Jones P., Smith K.* Key Management in IoT: Challenges and Solutions. International Journal of Network Security. 2018. P. 78-95.
7. *Guo J., Peyrin T., Poschmann A., Robshaw M.* The LED Block Cipher. Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg. 2011. P. 326–341.
8. *Ebrahim M., Chong C.W.* Secure Force: A low-complexity cryptographic algorithm for Wireless Sensor Network (WSN) // 2013 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering. 2013. P. 557-562.
9. *Стариков А.Д.* Обзор криптографических алгоритмов в сетях интернета вещей. М.: Молодой ученый, № 21 (520). 2024. С. 94-96.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАСКАДНОЙ СХЕМЫ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ LDPC-КОДА

Романцов Андрей Петрович

Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), доцент, к.т.н., Москва, Россия
a.p.romancov@mtuci.ru

Минаева Мария Константиновна

Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), Москва, Россия
zodiak1710@mail.ru

Аннотация

Авторы рассматривают принципы кодирования и декодирования LDPC-кода и БЧХ-кода, проводят моделирование и анализ каскадной схемы с применением LDPC и БЧХ-кодов в среде Matlab. Полученные результаты экспериментов, демонстрируют эффективность применения каскадного кодирования для повышения помехоустойчивости всего канала связи

Ключевые слова

Помехоустойчивый код, корректирующие коды, обнаружение ошибок, каскадный код, БЧХ-код, LDPC-код.

Введение

В настоящий момент отрасль применения помехоустойчивых кодов обширна. Ее применение – ключевой аспект в работе любой системы передачи данных и хранения. Обнаруживать и исправлять ошибки – необходимость, обусловленная получением достоверной и надежной информации. Сильная зашумленность, возникающие ошибки и неточности во время передачи по каналам связи приводят к получению недостоверных данных и показателей. Создание усовершенствованных схем, способных передавать информацию с наименьшим количеством ошибок – одна из задач современной теории помехоустойчивого кодирования. Поэтому потребность в разработке новых корректирующих кодов, а также в модификации существующих является первостепенной при создании новых современных стандартов связи. Одной из модификаций является применение каскадной кодовой конструкции. Это мощный инструмент обработки информации, сочетающий в себе преимущества каждого кода в каскадной схеме. До недавнего времени такие конструкции только-только стали набирать обширный охват, и уже сейчас нередко используются в новых стандартах связи. Внедрение в них одного из современных корректирующих кодов, а именно LDPC-кода, и его применение с использованием различных помехоустойчивых кодов – является актуальной темой.

Основные аспекты помехоустойчивого кодирования

Основная функция помехоустойчивого кодирования заключается в решении задачи получения наиболее высокой достоверности передаваемых данных при цифровой передаче. Для этого в составе любой цифровой системы используются устройства кодирования и декодирования.

Упрощенный принцип работы такой системы можно описать следующим образом: входной сигнал с источника сообщения поступает на кодер канала, где входной сигнал преобразуется в двоичную информационную последовательность (информационное слово). Полученное информационное слово передается на помехоустойчивый кодер, где конвертируется в кодовую последовательность (кодовое слово). Затем кодовое слово поступает на модулятор и уже в канал передачи.

При приеме, на выходе из канала находится демодулятор необходимый для преобразования принятого физического сигнала в информационную последовательность, а уже затем помехоустойчивый декодер, который обнаруживает и исправляет ошибки. Только после этого исправленная последовательность поступает на декодер канала, преобразующий ее в физический сигнал, принимаемый в приемнике.

LDPC-код (Low – Density Parity – Check)

Коды с малой плотностью проверок на чётность, или же низко-плотностные (LDPC-код) – коды, класса блочных линейных кодов с проверкой чётности. Данный код поддерживает более облегченную процедуру декодирования, в сравнении с другими видами кодов данного класса. Разреженный вид проверочной матрицы данного кода уменьшает вычислительные затраты во время процедуры декодирования, а легкая визуализация (граф Таннера) данного процесса позволяет сделать построение более удобным.

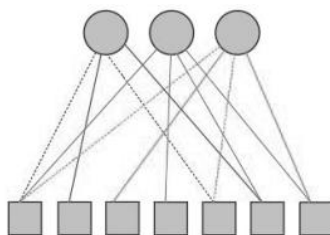


Рис. 1. Граф Таннера

Уже сейчас такие коды применяются в системах связи пятого поколения – 5G. Сейчас LDPC-коды, благодаря отличной корректирующей способности, рассматриваются разработчиками нового стандарта беспроводного соединения Wi-Fi 7.

Как и у всех кодов блочного класса, низко-плотностные коды кодируются путем разработки первоначальной проверочной H матрицы, с последующем определением соответствующей ей порождающей G матрицы.

Для декодирования LDPC-кодов существует несколько вариаций алгоритмов, а именно: с жестким и мягким принятием решения и их модификации.

Для декодирования с жестким решением характерно использование дискретных величин. Такой метод является самым распространенным и применимым к помехоустойчивым кодам. Примером может служить алгоритм с инверсией бита, по которому декодер производит проверку на четность, и при наличии не выполненных проверочных уравнений инвертирует бит.

Для декодирования с мягким решением используются вещественные величины (вероятности), полученные из канала. Данный алгоритм сложен в создании, но имеет наибольшую корректирующую способность. Примером может служить алгоритм с распространением доверия, в котором декодер вместо принятия сообщений, представляющих битовое значение, принимает их вероятности.

БЧХ-код (Боуза – Чоудхури – Хоквингема)

Код Боуза – Чоудхури – Хоквингема (БЧХ-код) – один из классов циклических кодов, применяющийся для защиты данных от ошибок в процессе передачи. При создании данного кода используется образующий циклический полином, а значит требуется заранее задать длину кода и значение требуемого минимального расстояния. Такой код отчасти рассчитан на работу с конечными длинами кодовой последовательности, однако его циклическая структура, с возможностью заранее задать параметры, делает его неотъемлемым в современных системах связи, где требуется высокая надежность передачи данных.

Для кодирования БЧХ-кодов необходимо определить порождающий полином $g(x)$. Этот полином строится на основе минимального расстояния d и длины кода n . Для этого применяются два основных метода:

1. Несистематическое кодирование: кодовое слово формируется путем умножения информационного полинома $m(x)$ на порождающий полином $g(x)$.

2. Систематическое кодирование: кодовое слово состоит из информационного и проверочного блоков.

При декодировании циклического кода производится деление кодового слова на производящий многочлен. При делении кодового слова на производящий многочлен без остатка фиксируется отсутствие ошибок. Остаток указывает на искажение передаваемого слова.

Каскадные схемы помехоустойчивого кодирования

Каскадные коды – коды с каскадным включением более простых кодовых конструкций (последовательное подключение простых кодеров). Такие коды наиболее применимы в системах с сильным зашумлением канала передачи. Так как модификации и комбинирование нескольких кодовых последовательностей заметно облегчают процедуры кодирования и декодирования, на сегодняшний день они считаются одними из лучших кодовых помехоустойчивых комбинаций.

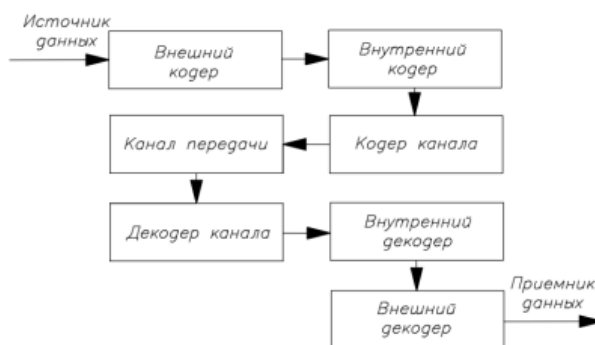


Рис. 2. Схема построения каскадного кода

Облегченная схема каскадного кода может быть представлена так: информация поступает на внешний кодер (код 1), а потом на внутренний (код 2). Затем информация идет на внутренние кодирующие устройство и в канал. Принятая из канала связи информация будет принята общим декодирующим устройством, а затем внутренним (код 2) и внешним (код 1) декодером.

На настоящее время наиболее известная каскадная комбинация: внешний кодер – блочный код Рида-Соломона и внутренний кодер – свёрточный код. Такие коды использовались в стандартах DVB – S и DVB – T.

Моделирование схемы LDPC-кода

Для изучения основных аспектов низко-плотного кода, а также его свойств для дальнейшего применения в каскадных схемах, было проведено тестирования созданной модели, содержащей кодек LDPC-кода, в прикладной среде Spectr-2с.

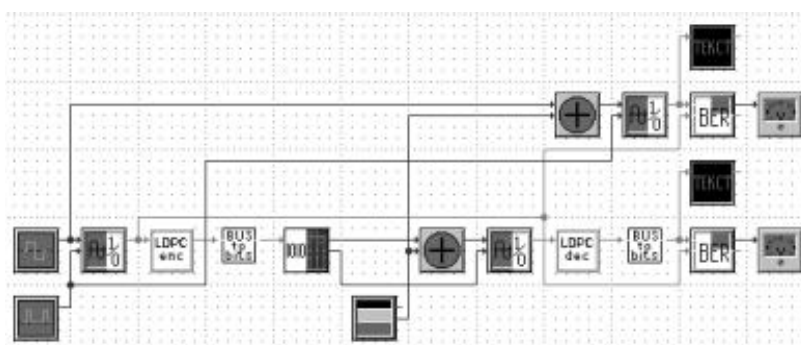


Рис. 3. Схема модели для исследования LDPC-кода

В данной схеме задействовались несколько вариаций устройств, в том числе: кодер LDPC-кода, который выполняет процедуру кодирования заданной последовательности, а также декодер LDPC-кода, который выполняет процедуру декодирования полученной последовательности бит в соответствии с выбранным методом декодирования.

Тестирование проводилось для нескольких возможных зависимостей. В результате проведенного эксперимента были построены:

1. Кривые зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал шум (ОСШ) для разных алгоритмов декодирования LDPC-кода. Энергетический выигрыш кодирования при использовании алгоритма инверсии бита составил 1 дБ, а по алгоритму распространения доверия – 3,2 дБ.
2. Кривые зависимости вероятности ошибки от ОСШ для проверочных матриц Галлагера и МакКея-Нила. Энергетический выигрыш кодирования при использовании проверочной матрицы Галлагера составил 2,1 дБ, а для проверочной матрицы МакКея-Нила – 3,1 дБ.

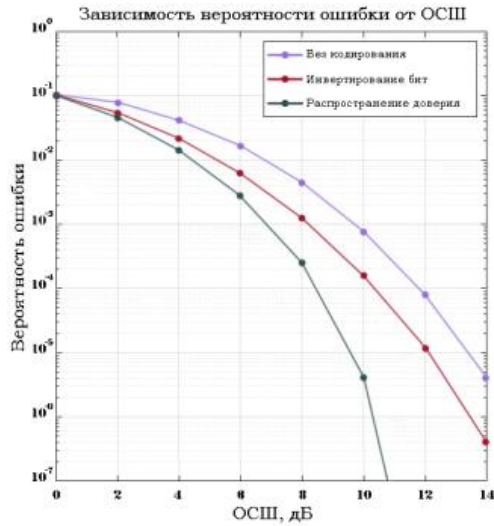


Рис. 4. Вероятность ошибки от ОСШ для разных алгоритмов декодирования

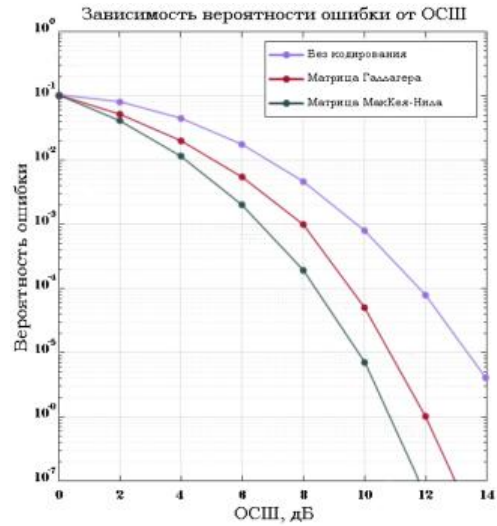


Рис. 5. Вероятность ошибки от ОСШ для разных проверочных матриц

Тестирование каскадной схемы с применением БЧХ и LDPC-кода

Было проведено исследование каскадной схемы, соединяющей БЧХ-код и LDPC-код, на построенной в среде Matlab модели, при различных значениях ОСШ. Дальнейшая визуализация будет проводиться в прикладной среде Spectr-2с.

В данной кодовой конструкции код БЧХ занимает место внешнего кодера и декодера которые направлены на исправление грубых ошибок, полученных во время передачи по каналу связи. Внутренний кодер и декодер низко-плотностного кода, отвечают за дополнительное исправление случайных ошибок на более низком уровне. Благодаря такому подходу отношение сигнал шум возрастает, что наиболее эффективно при сильной зашумлённости канала.



Рис. 6. Визуальное представление работы каскадного кода для первой зависимости

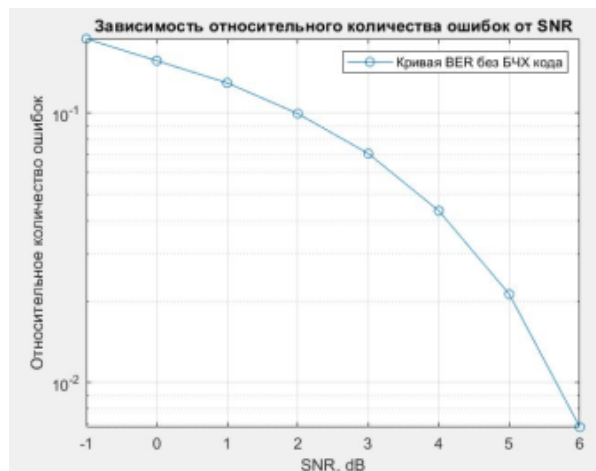


Рис. 7. Зависимость относительного количества ошибок от ОСШ, при ОСШ равном 6, без БЧХ-кода

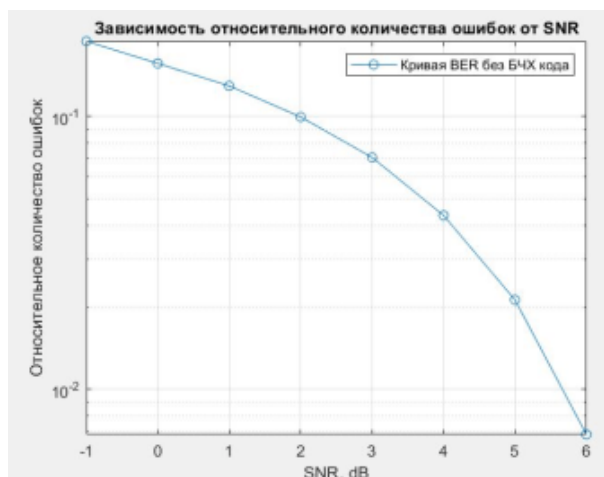


Рис. 8. Зависимость относительного количества ошибок от ОСШ, при ОСШ равном 6, с БЧХ-кодом

В первом эксперименте использовалось значение 6 для ОСШ. По полученному изображению можно выделить участки, где фиксировалось наличие ошибок (наличие инвертированных цветowych точек). Полученные графики и визуальное представление показывают, что при отсутствии БЧХ-кода, исправляющая способность заметно снижается, тем не менее это не слишком критично при начальном большом значении ОСШ.



Рис. 9. Визуальное представление работы каскадного кода для второй зависимости

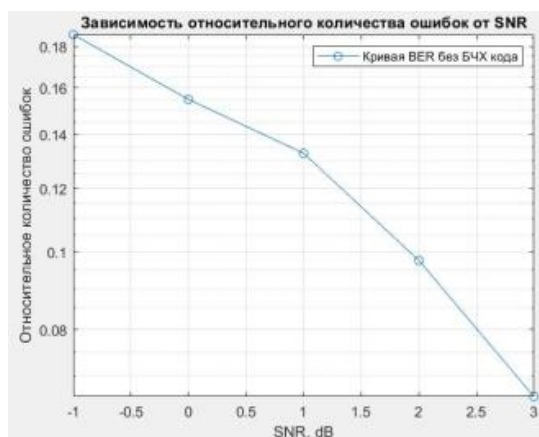


Рис. 10. Зависимость относительного количества ошибок от ОСШ, при ОСШ равном 3, без БЧХ-кода

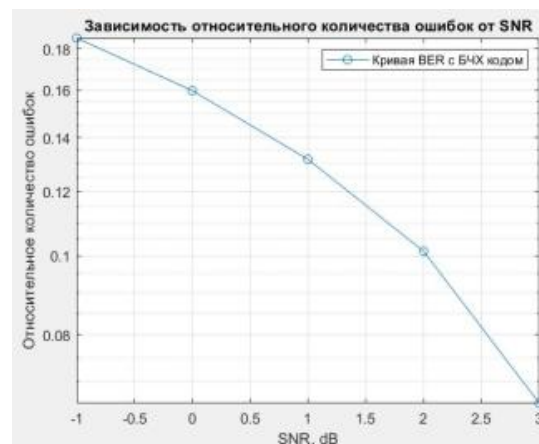


Рис. 11. Зависимость относительного количества ошибок от ОСШ, при ОСШ равном 3, с БЧХ-кодом

Во втором эксперименте использовалось значение 3 для ОСШ. Полученные графики и визуальное представление отображают заметное отличие от прошлого эксперимента.

При начальном меньшем значении ОСШ, корректирующая способность кода снижалась в разы, что еще больше заметно при сравнении двух визуальных представлений (наличие множества инвертированных точек указывает на возникновение гораздо большего количества ошибок). Графики, отображающие наличие или отсутствие БЧХ-кода, демонстрируют отрицательную динамику.

Заключение

В настоящей работе приведен анализ и серия экспериментов разработанных моделей, что позволило выделить четыре помехоустойчивые характеристики, а именно: вероятность ошибки от ОСШ для разных алгоритмов декодирования, для разных проверочных матриц, зависимость относительного количества ошибок от ОСШ для различных значений, с БЧХ-кодом и без. По полученным результатам, можно сделать вывод, что использованные коды, в каскадной схеме, способны исправлять ошибки без увеличения избыточности передаваемых данных. Уже сейчас каскадные конструкции подобного типа используются и внедряются в современные стандарты цифрового телевидения и спутниковой связи.

Проведённые исследования позволили заключить, что перспектива внедрения LDPC-кодов в различные новые стандарты связи, а также их применения в каскадных помехоустойчивых схемах, с другими известными корректирующими кодами, в том числе с БЧХ-кодом, является важным шагом к повышению эффективности передачи информации. Изучение корректирующей способности различных помехоустойчивых кодов в каскадной схеме с LDPC-кодом является еще одним неотъемлемым шагом к приближению наибольшей точности передачи данных в дальнейшей перспективе.

Литература

1. Галлагер Р. Дж. Коды с малой плотностью проверок на четность / пер. с англ. А. Шевердяева. М.: Мир. 1966. 145 с.
2. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. М.: Мир, 1986. 576 с.
3. Кушнеров А.В., Липницкий В.А., Королева М.Н. Обобщенные коды Боуза-Чоудхури-Хоквингема и их параметры // Вестник Полоцкого государственного университета. 2018. Серия С. С. 28-33.
4. Мак-Вильямс Ф. Дж., Слоэн Н. Дж. А. Теория кодов, исправляющих ошибки: пер. с англ. М.: Связь, 1979. 744 с.
5. Ничипорук Н.Е., Сай С.В. Эффективность применения каскадных кодов в системах передачи подводных изображений // ВЕСТНИК ТОГУ. 2015. № 4(39). С. 117-124.
6. Тютякин А.В. Основы эффективного и помехоустойчивого кодирования сообщений: учебное пособие для высшего профессионального образования. Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2015. 180 с.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БЫТОВЫХ ИМПУЛЬСНЫХ БЛОКОВ ПИТАНИЯ В ТРАНЗИСТОРНЫХ УСИЛИТЕЛЯХ МОЩНОСТИ КЛАССА HI-FI

Микенин Алексей Эдуардович

*Московский технический университет связи и информатики,
старший преподаватель кафедры «Радиооборудование и схемотехника», Москва, Россия*

a.e.mikenin@mtuci.ru

Хачатрян Дмитрий Владимирович

Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

d.v.hachatryan@mtuci.ru

Красиков Дмитрий Александрович

Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

d.a.krasikov@mtuci.ru

Аннотация

В данной статье рассматривается вопрос применения различных блоков питания в высококачественной звуковой аппаратуре. Производится сравнение линейных блоков питания с импульсными. Проводится исследование особенностей применения импульсных блоков питания и способы подавления их шумов. В статье приведена схемотехническая модель усилителя, а также описан физический макет.

Ключевые слова

звуковой усилитель, блок питания, Hi-Fi, операционный усилитель, транзисторный усилитель

Введение

На сегодняшний день, при проектировании звуковых усилителей для самых разных целей – от бытового прослушивания музыки до использования в профессиональных акустических системах, таких как концертные залы, клубы и студии звукозаписи, одна из ключевых проблем заключается в проектировании качественного и стабильного блока питания. Этот компонент является неотъемлемой частью любого усилителя, и его правильное проектирование существенно влияет на общий уровень качества работы усилителя в целом. Решение проблемы с блоком питания при разработке звуковых усилителей становится важной задачей, и зачастую она оказывается значительно более сложной, чем проектирование непосредственно усилителя, который отвечает за усиление сигналов звукового тракта. Причем, качество блока питания напрямую влияет на чистоту звука, минимизацию помех и шумов, а также на эффективность работы усилителя в разных режимах.

Результаты исследований

В классических звуковых усилителях с давних пор и по сей день используются линейные блоки питания [1], содержащие в себе трансформатор, диодный мост, конденсатор и фильтрующую систему. Пример типичного линейного блока питания приведен на рисунке 1. Принцип работы их достаточно прост. Сетевое напряжение 220 В и частотой 50 Гц через понижающий (или наоборот, повышающий) трансформатор преобразуется в другое напряжение, необходимое для устройства. Одновременно с этим, трансформатор обеспечивает гальваническую развязку, обезопасив тем самым инженера-проектировщика и конечного потребителя от риска поражения электрическим током. Это напряжение подается на диодный мост, где происходит его преобразование в пульсирующее напряжение.

Полученные импульсы заряжают собой электролитический конденсатор большой емкости, подключенный на выходе диодного моста, что преобразует пульсирующее напряжение в постоянное с небольшими пульсациями. Такого напряжения уже вполне достаточно для работы усилителя, однако для использования с акустическими системами оно всё еще не годится, поскольку гул сетевого напряжения будет ощутимо слышным в динамиках.

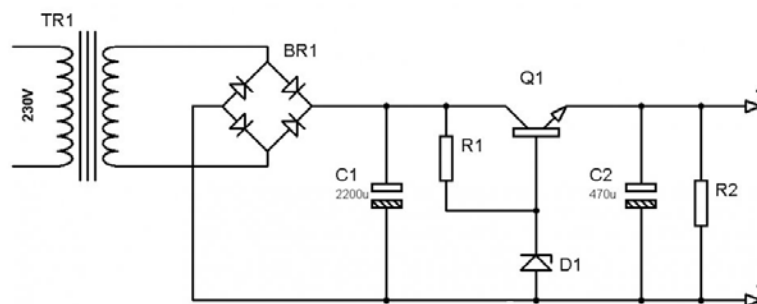


Рис. 1. Схема линейного блока питания

Преимуществами такого блока питания является линейность преобразования, благодаря которой он обладает очень низким уровнем высокочастотных пульсаций (как в сторону усилителя, так и в сторону сети 220 В, что является очень важным критерием с точки зрения электромагнитной совместимости), невосприимчивостью к помехам от сети и надежностью. Кроме того, конструкция такого блока питания очень простая, равно как и схема, что делает его удобным для расчёта и потенциально возможного ремонта.

За эти свойства такой блок питания очень высоко ценится разработчиками ламповой и транзисторной усилительной техники класса Hi-End, и по сей день считается «более правильным» способом организации питания усилителей.

Однако у таких блоков питания есть масса недостатков. Самый основной из них - габариты, связанные с трансформатором, который тем больше, чем большая мощность требуется на выходе блока питания. Поэтому, в большинстве случаев в современной технике чаще используются другие блоки питания, называемые импульсными.



Рис. 2. Структурная схема импульсного блока питания (ИБП)

Такой блок питания [2] работает по иному принципу. Сетевое напряжение подается на выпрямитель – диодный мост и конденсатор, аналогичные линейному блоку питания. Пониженное через DC-DC преобразователь до необходимых величин напряжение подает питание на генератор прямоугольных импульсов с достаточно большой (десятки или сотни килогерц), основанный на широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Этот ШИМ открывает и закрывает мощный силовой ключ, выполненный на MOSFET или IGBT транзисторе, через который пропускается напряжение с выхода выпрямителя. В результате получается последовательность прямоугольных импульсов высокой частоты, которая подается на силовой трансформатор, который выполняет ровно ту же роль, что и в линейном блоке питания – гальваническую развязку. Такой трансформатор, ввиду большой частоты подаваемого на него напряжения, при той же мощности, будет иметь на порядки меньшие габариты, чем в линейном блоке питания. После чего это напряжение выпрямляется и подается на конечное устройство.

При очевидных преимуществах такого способа питания конечных устройств, в основном, решающих недостатки линейного блока питания, он имеет массу недостатков собственных. Самый главный из них – высокочастотные помехи, создаваемые импульсной природой напряжения блока питания. Амплитуда этих импульсов может достигать единиц или даже десятков процентов от напряжения питания, особенно в случае, если ИБП предназначен для работы в устройствах, где его высокочастотные помехи несущественны, таких как осветительные LED-ленты.

Пример таких осциллограммы таких пульсаций приведен на рисунке 3.

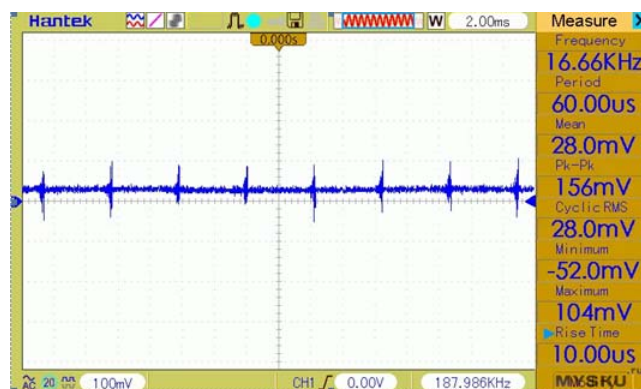


Рис. 3. Помехи импульсного блока питания

При попытке использования бытовых ИБП в звуковых усилителях возникает масса проблем. Самой главной из них является то, что импульсы блока питания чаще всего прекрасно слышны при работе усилителя на акустическую систему, поскольку производители ИБП зачастую экономят на компонентной базе и не делают частоту ШИМ-модулятора достаточно высокой. Из-за этого, при проектировании возникает задача помехи, создаваемые ИБП, каким-либо образом подавить.

Простейшим, на первый взгляд, решением проблемы является поставить на выходе ИБП пассивный RC или LC фильтр, или же микросхему стабилизации напряжения. В принципе, идея является рабочей, до тех пор, пока в игру не вступает выходной усилительный каскад, ток через который может достигать единиц или даже десятков ампер (к примеру, при использовании усилителей в концертных залах или на открытых площадках, где от него требуется выходная мощность несколько киловатт). Тут идея фильтрации напряжения блока питания сразу сталкивается с несколькими проблемами.

Прежде всего, любой из фильтров будет неизбежно ухудшать КПД устройства. Резистор, при использовании в RC-цепочке будет сильно греться. Катушка индуктивности, в случае фильтрации LC-цепочкой, будет также сильно греться, поскольку индуктивность достаточной величины для ее применения в фильтре будет иметь большое паразитное активное сопротивление. Любой стабилизатор питания, хоть на микросхеме серии LM, хоть на MOSFET или биполярном транзисторе, должен будет терять несколько вольт напряжения, что также относится и к вариантам с резистором и катушкой. И, также как и они, он будет греться. В случае если для питания усилителя применяются низковольтные (5, 9, 12 В) блоки питания, это довольно критично сказывается на максимально возможной выходной мощности усилителя.

Выход из этой ситуации можно найти, применив LC-фильтр на выходе блоков питания только к предварительным каскадам усиления, игнорируя выходной. Пример такого исполнения усилителя в программе Micro-Cap [3] приведен на рисунке 4.

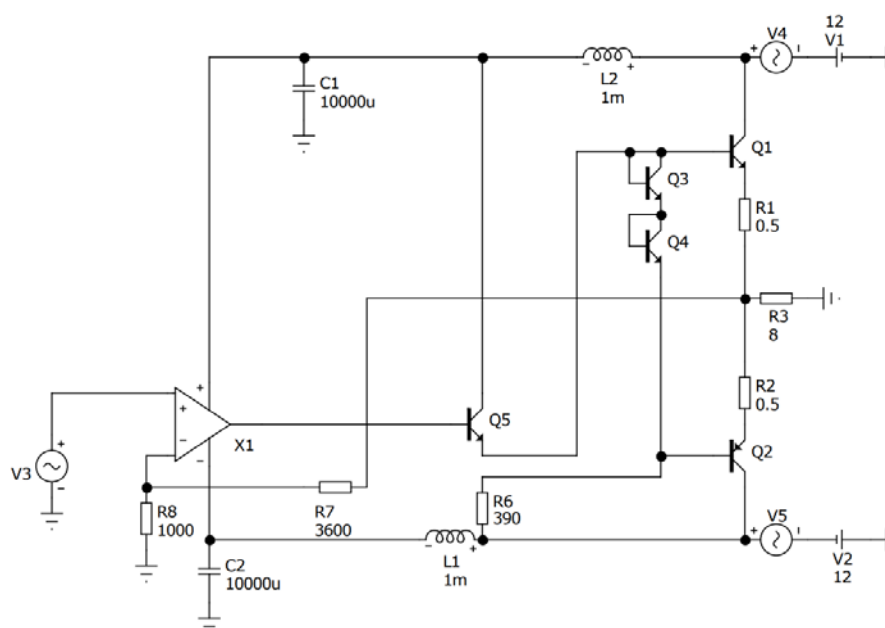


Рис. 4. Схема транзисторного звукового усилителя с двухполярным питанием с имитацией шума на выходе блоков питания

Выходной каскад этого усилителя выполнен по классической двухтактной схеме в классе В на транзисторах 2SC4467 и 2SA1694, являющимися друг для друга комплементарной парой. В цепи базы стоят два транзистора BD139, обеспечивающие выходному каскаду рабочую точку для класса В. В данной схеме они стоят, поскольку схема использовалась для физической реализации усилителя, и два транзистора, в диодном включении, прикрученные винтом к тем же радиаторам, что и транзисторы выходного каскада, связаны с ними по температуре. Это необходимо для повышения стабильности рабочей точки. Размещение транзисторов на корпусе усилителя приведено на рисунке 5. Мощные транзисторы выходного каскада прикреплены к медным пластинам сразу под черными радиаторами, а транзисторы, выполняющие роль диодов – с внутренней стороны.

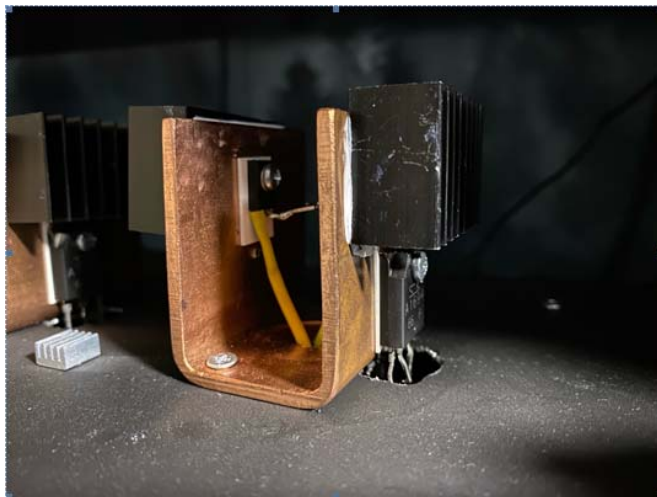


Рис. 5. Внешний вид транзисторов выходного каскада на радиаторе

Усиление напряжения происходит в операционном усилителе TL082, к которому подключена обратная связь с выхода усилителя. Таким образом, поскольку в схеме нет ни одного разделительного конденсатора, помимо обратной связи по переменному току, образуется также обратная связь по постоянному току, выравнивающая постоянные потенциалы в разных узлах схемы, с целью обеспечить на выходе усилителя 0 В постоянного смещения. Операционный усилитель и выходной каскад связаны через эмиттерный повторитель, построенный на еще одном транзисторе BD139, поскольку операционному усилителю TL082 не хватает мощности, чтобы обеспечить достаточную величину входного переменного тока для транзисторов выходного каскада.

В качестве эксперимента в схемотехнической модели приведены источники напряжения V4 и V5, симулирующие помехи импульсных блоков питания. Оба генератора синусоидального сигнала имеют амплитуду 2 В и частоту 100 кГц – сигнал с похожими параметрами (с отличием только в форме и амплитуде) наблюдался на осциллографе при испытании блоков питания, используемых в физической реализации усилителя. В случае схемотехнической модели, представленной в данной статье, шумы представлены намеренно большими – их амплитуда на реальных блоках питания была на порядок меньше.

Основная идея эксперимента состоит в том, что, поскольку выходной каскад построен по схеме эмиттерного повторителя, а его транзисторы работают либо в активном режиме, либо в отсечке. Из чего следует, что ток коллектора, как переменный, так и постоянный, зависит целиком и полностью от тока базы и довольно слабо зависит от флуктуаций напряжения коллектор-эмиттер, и эта зависимость, в основном, обусловлена только эффектом Эрли. Это даёт надежду, что, поскольку помехи импульсного блока питания имеют небольшую амплитуду, то достаточно отфильтровать их только на маломощных предварительных каскадах усиления, что избавляет от необходимости делать сложный фильтр, учитывающий большую амплитуду тока выходного каскада.

На рисунке 6 приведены временные зависимости на входе и выходе усилителя при работе на нагрузку 8 Ом.

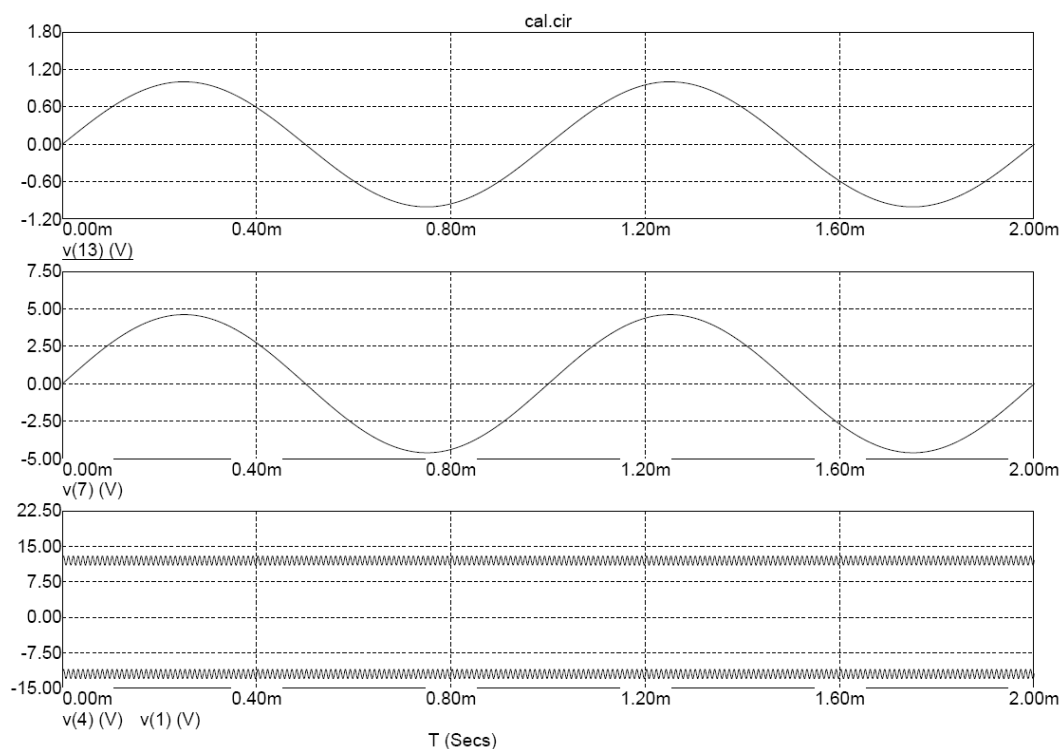


Рис. 6. Зависимости напряжений на входе, выходе и источниках питания усилителя

Как можно видеть из рисунка 6, видимого влияния шумов блока питания на осциллограмме сигнала на выходе усилителя не наблюдается. Это дает возможность высказать предположение, что шумы блока питания не проходят в звуковой тракт. Проведенное прослушивание полностью собранного усилителя это предположение подтверждает – из акустической системы не было слышно ни единого признака наличия шумов ИБП. Однако, как было сказано ранее, некоторая зависимость напряжения на акустике от напряжения коллектор-эмиттер транзисторов всё-таки есть. Это можно увидеть на спектральном анализе полученного сигнала (рис. 7).

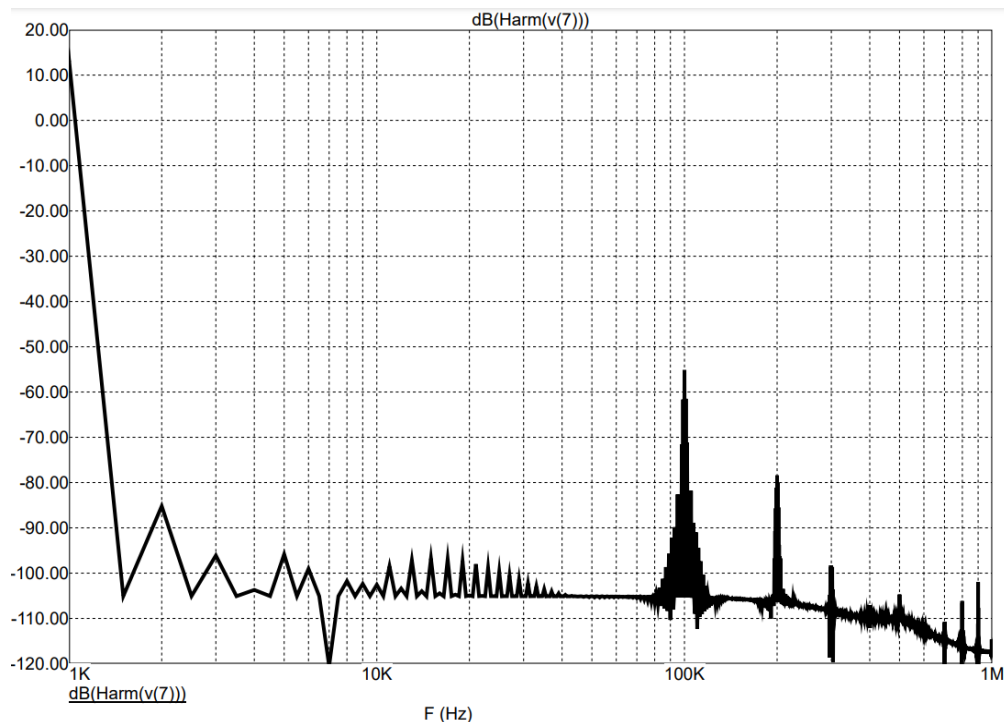


Рис. 7. Спектральные характеристики сигнала на выходе усилителя

Как видно из рисунка 7, основная гармоника имеет величину около 15 дБ. За счёт применения операционного усилителя, а также дополнительной обратной связи, звуковой сигнал, поданный на вход системы, усиливается очень линейно – суммарный коэффициент гармоник составляет доли процента, ближайшая по величине, 2-я гармоника, имеет величину на 90 дБ меньше основной. В спектре также присутствуют составляющие, вызванные помехами блока питания. Однако их максимальная величина составляет порядка -50 дБ, что, учитывая частоту далеко за пределами полосы слышимости, не должно повлиять на качество звука.

Также можно снять его амплитудно-частотную характеристику (АЧХ). Изображение АЧХ представлено на рисунке 8.

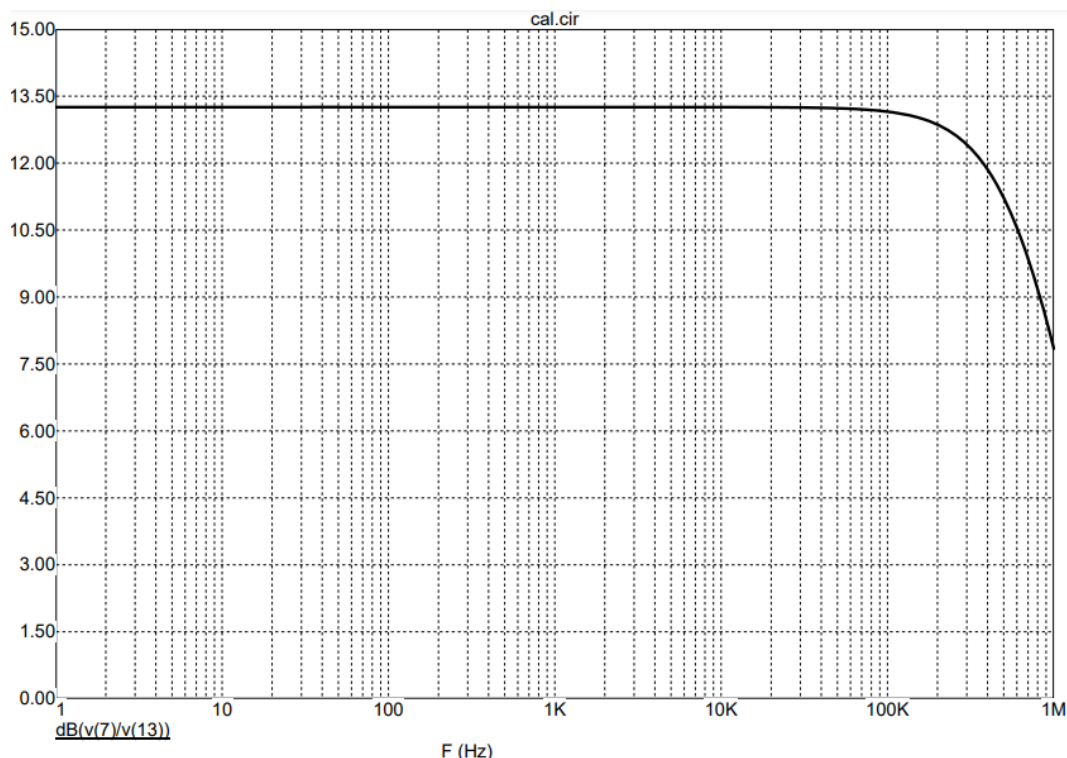


Рис. 8. Амплитудно-частотная характеристика усилителя

Как видно из АЧХ – рабочая полоса частот укладывается в полосу слышимости, что гарантирует хорошую достоверность звучания на самой требовательной акустике.

Заключение

Выбор блока питания является одним из важнейших этапов проектирования звукового усилителя. От его качества зависит множество аспектов, в первую очередь – качество звучания. При проектировании усилителей, в особенности класса Hi-Fi или Hi-End [4], стараются добиться максимально возможных результатов, из-за чего блок питания, особенно в ламповых усилителях, может быть сложнее и больше, чем непосредственно схема усилителя. Однако, в некоторых случаях, вполне бюджетного и не очень хорошего, на первый взгляд, решения, может быть вполне достаточно для качественной работы всей системы. Применение обычного блока питания для светодиодных лент, вполне успешно [5] может быть применено в звуковом усилителе, с довольно незначительными доработками в виде простенького фильтра в предварительных каскадах. С другой стороны, раскрываются преимущества такого решения, в виде стабильного питания при не самом стабильном сетевом напряжении и простоты монтажа в корпусе.

При экспериментальном исследовании результаты, полученные на физическом макете, полностью совпали с результатами схемотехнического моделирования, что подтверждает адекватность представленной модели.

Литература

1. *Ананченко Л.Н., Клименко И.С., Рогов И.Е.* Проблема снижения пульсаций напряжения в источниках электропитания // Молодой исследователь Дона. 2023. Т. 8, № 3(42). С. 5-8.
2. *Ваганов А.И., Замалиева М.Р., Гильфанов К.Х.* Особенности работы импульсных блоков питания. Сравнение импульсных и линейных блоков питания // Наука и современное общество: актуальные вопросы, достижения и инновации : Сборник статей V Международной научно-практической конференции, Пенза, 20 декабря 2020 г. Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2020. С. 29-32.
3. *Болотов А.О., Холюков Р.Г., Кубицкий А.А., Бажин А.В.* Исследование влияния динамических головок на технические характеристики усилителя на лампах и усилителя на ПТ в программе Micro-Cap // Телекоммуникации и информационные технологии. 2016. №1. С. 35-38.
4. *Бажин А.В., Микенин А.Э.* Сравнение ламповых усилителей: современных класса High-End и ранее выпускавшихся в составе радиол и радиоприёмников // Физика, техника и технология сложных систем : Тезисы докладов Всероссийской с международным участием молодежной научно-практической конференции. Ярославль: Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, 2020, 2020. С. 172-173.
5. Импульсные блоки питания для аудио // Форум по радиоэлектронике URL: <https://forum.cxem.net/index.php?/topic/16304-импульсные-блоки-питания-для-аудио-техники/> (дата обращения: 25.01.2025).

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Ерастов Александр Дмитриевич
магистрант МТУСИ
viperer@mail.ru

Тугова Наталья Владимировна
Зав. кафедрой «Бизнес-информатика» МТУСИ

Аннотация

В статье рассматривается автоматизированное решение, для передачи информации в локально вычислительных сетях. В качестве вариантов было рассмотрено несколько готовых решений, которые не подходят по требованиям. В результате было представлено разработанное программное решение, которое удовлетворяет всем требованиям.

Ключевые слова

Автоматизация, информация, космические системы, разработка

Введение

Космические системы (КС) дистанционного зондирования земли стремительно развиваются. На протяжении последних 7 лет было запущено не мене 9 КС в интересах Росгидромета:

- 1 февраля 2018 года в 5 утра мск выполнен запуск серии космических аппаратов «Канопус-В» №№ 3 и 4;
- 27 декабря 2018 года выполнен запуск космических аппаратов серии «Канопус-В» №№ 5 и 6;
- 5 июля 2019 года в 8 утра мск выполнен запуск космического аппарата «Метеор-М» № 2-2;
- 24 декабря 2019 года в 3 дня мск выполнен запуск космического аппарата «Электро-Л» №3;
- 28 февраля 2021 года в 12 дня мск выведен на орбиту космического «Арктика-М» № 1;
- 5 февраля 2023 года в 12 дня мск выполнен запуск космического аппарата «Электро-Л» № 4;
- 7 июня 2023 года в 14 дня мск выполнен запуск космического аппарата «Метеор-М» № 2-3;
- 16 декабря 2023 года в 12 дня мск выполнен запуск космического аппарата «Арктика-М» № 2;
- 29 февраля 2024 года в 08 утра мск выполнен запуск космического аппарата «Метеор-М» № 2-4;
- 5 ноября 2024 года в 02 ночи мск выполнен запуск серии космических аппаратов «Ионосфера-М» № 1 и № 2.

Космических систем становится все больше: на текущий момент успешно эксплуатируется 18 космических систем. Пять систем серии Канопус-В, две системы Метеор-М, две системы серии Арктика-М, три системы серии Электро-Л. Двенадцать космических аппаратов из вышеописанных работают в непрерывном (штатном) режиме приема информации. Космические аппараты передают информацию из космоса в виде снимков земли, в специальном формате данных.

Например, группировка серии Канопус-В, состоящая на текущий момент из 5 космических аппаратов, сбрасывает порядка 28 сеансов в сутки, что составляет примерно 90 Гбайт данных в сутки.

Группировка Электро-Л, состоящая из трех аппаратов, с каждого аппарата принимается по 80 сеансов в сутки, суммарно получаются порядка 456 Гбайт данных в сутки.

Группировка Метеор-М, состоящая из двух аппаратов, принимается порядка 61 сеанса, что составляет порядка 223 гигабайт спутниковых данных.

Группировка Арктика-М, состоящая из двух аппаратов, принимает порядка 96 сеансов, что составляет порядка 182 Гбайт спутниковой информации.

Копирование информации в локальных вычислительных сетях оказалось не тривиальной задачей. Основная проблема заключается в том, что объем информации повышается в арифметической прогрессии. На текущий момент объем данных достигает примерно 950 Гбайт в сутки. Программное обеспечение, разработанное ранее, стало не справляться с большим объемом информации, потребовалось отправиться на поиски решений. Для анализа были выбраны несколько решений, которые можно загрузить из Интернет и начать сразу ими пользоваться.

Анализ существующих решений

Решение «Exiland Backup»

Решение от 1С называется «Exiland Backup». Легко настраивается и хорошо работает, имеет богатый функционал, главное окно программы представлено на рисунке 1.

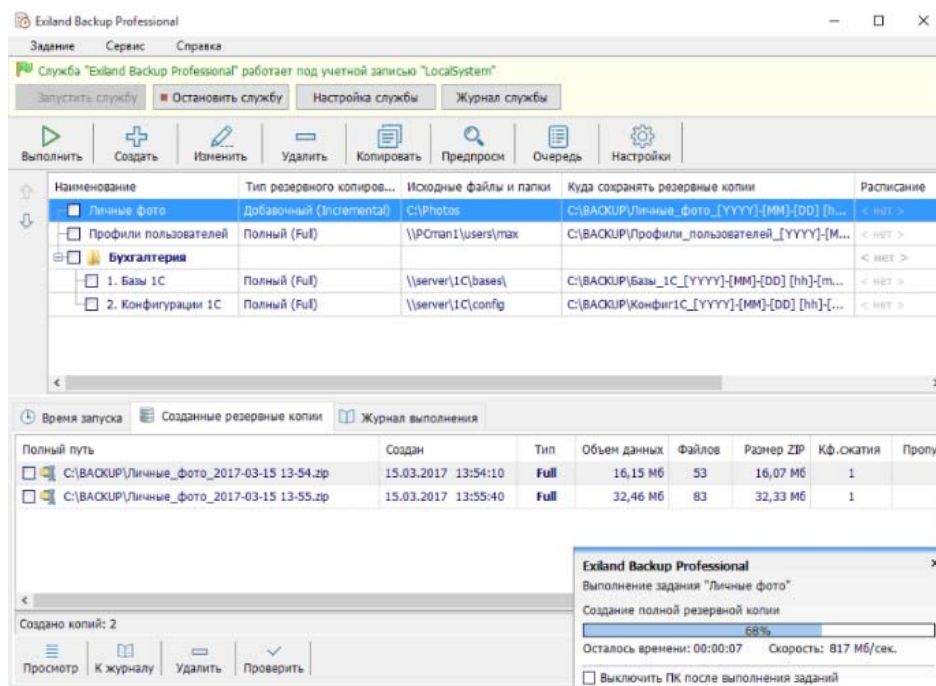


Рис. 1. Главное окно Exiland Backup

На рисунке 1 представлено обилие инструментов по настройке и наблюдению за задачами выполнения. Разработчик представляет свое программное решение, как эффективный и гибкий инструмент для использования как на рабочих станциях, так и на серверах. Отлично справляется с резервным копированием рабочих каталогов, 1С баз данных, данных электронной почты и других профилей, требующих регламентное резервное копирование. В систему встроен инструмент для сжатия данных как во время копирования, так и во время архивации. Шифрование информации при ее передаче встроено по умолчанию, что является большим плюсом.

Из явных особенностей этого решения стоит отметить возможность синхронизировать файлы в UNIX-подобных системах по протоколам FTP, SSH, SMB. Резервное копирование с интеграцией сервиса Яндекс.Диск, реализовано также в базовом функционале. Теневое копирование файловых систем в операционных системах семейства MS Windows. Запуск в качестве службы без каких-либо дополнительных и лишних окон.

Решение Handy Backup

Позиционирует себя как гибко настраиваемый инструмент копирования файлов. Функционал как оказался сильно скромнее чем у предыдущего решения. Отсутствует возможность использовать в UNIX-подобных операционных системах, поддерживается только Windows. Не работает как служба. Поддерживает различные российские облачные сервисы, что, конечно, является плюсом, если требуется регулярная публикация информации в Интернет и предоставление общего доступа по ссылке. Поддерживаются сетевые протоколы только FTP и SMB. Присутствует возможность хранения информации в сжатом формате и есть возможность ее шифрования. По умолчанию можно настроить резервное копирование сервера почты и прочих Интернет-сервисов. Интерфейс окна очень аскетичен, очень мало настроек имеет максимальное сходство с планировщиком Windows (рис. 2, 3). По своим возможностям скорее подойдет для домашнего пользования, но не как корпоративное решение.

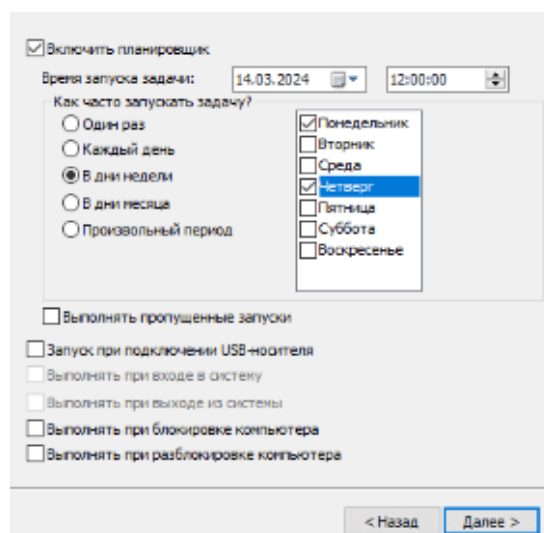


Рис. 2. Настройка расписания в Handy Backup

Решение FDFSpy

Это решение от VRCP Soft является факультативной разработкой Салтыкова Дмитрия, представляет собой программу FDFSpy или, как называет ее автор, утилита автоматизированного копирования информации.

Основные возможности программы позволяют автоматизировать процесс копирования информации по заданным критериям, отслеживать инициализацию подключаемых внешних устройств к системе с последующим интервалом опроса. Одно из задающихся параметров – использования масок файлов, то есть их расширений, например «.doc .pptx .zip и др.».

Из интересных особенностей программы можно отметить установку лимитов копирований и их размеров. В некоторых случаях это может быть актуально – если дисковое пространство подходит к концу, то инструмент предупредит об этом заранее, если указан данный параметр. Интерфейс программы представлен на рисунке 4.

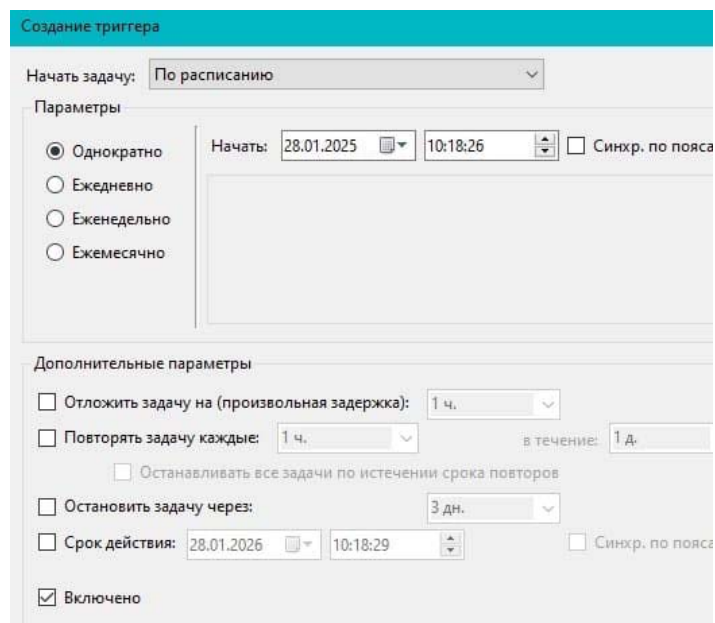


Рис. 3. Пример планировщика задач

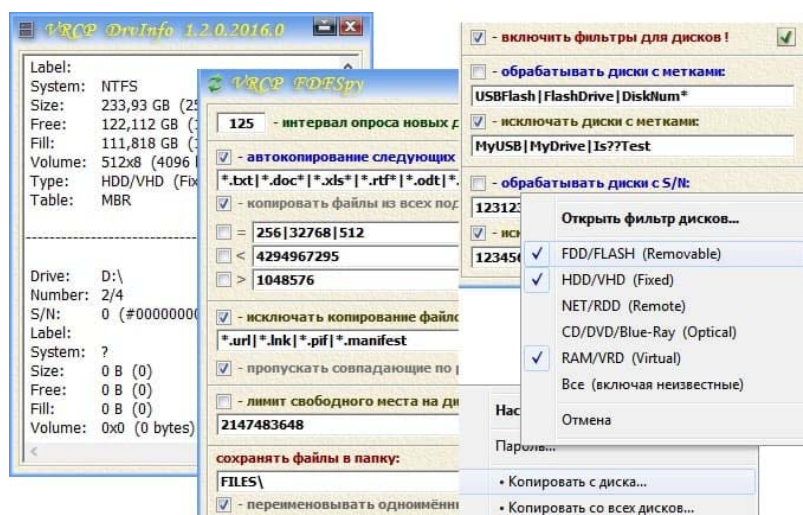


Рис. 4. Интерфейс FDFSpy

Решение killcopy

Программное решение killcopy выпущено в 2002 году энтузиастом-разработчиком Дмитрием Кононко. До 2009 года его разработка получала обновления и достигла версии 2.85, после чего разработка остановилась. Сайт разработчика по-прежнему доступен в Интернет. Важнейшим функционалом данного программного решения является возможность докачки файлов, в случаях обрыва канала связи и после его успешного восстановления. По сравнению с рассмотренными решениями данный инструмент прост: имеет минимальное количество экранных форм с настройками. Функционал, аналогичный проводнику Windows, доступен после выбора файлов правой кнопкой мыши (см. рис. 5).

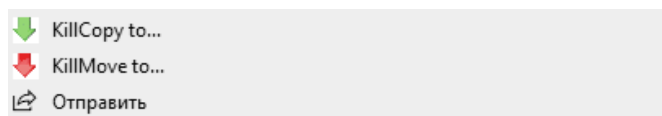


Рис. 5. Контекстное меню KillCopy

После выбора одного из пунктов «Copy to» или «Move to» интерфейс предложит указать куда сохранить результат выполнения выбранной операции. Окна интерфейсов представлены на рисунке 6.

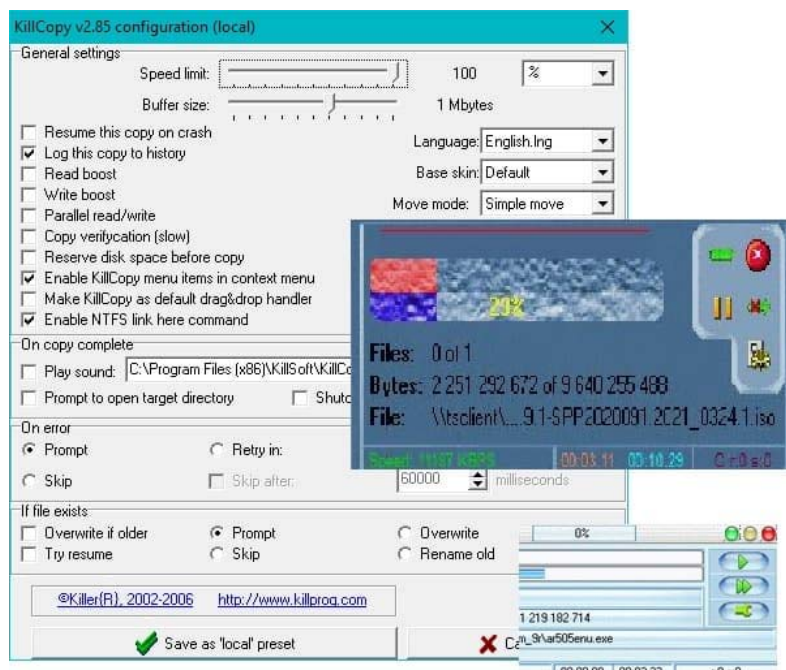


Рис. 6. Интерфейс KillCopy

В окне конфигурации (см. рис. 6), представлена возможность сконфигурировать поведение программной среды в различных условиях, используя графический интерфейс. Программное решение имеет большое количество возможностей. Размер буферного блока при копировании, ограничение скорости, распараллеливание потоков, проверка скопированной информации, резервирование места на дисковом носителе до момента копирования (обеспечивает защиту от переполнения дискового пространства). Присутствует большой набор ключей для использования в терминальном режиме.

Есть возможность запуска с заранее заготовленным конфигурационным файлом для выполнения копирования, своего рода файл задания на выполнение. Очень много ключей для выполнения в терминале, которые перестали быть актуальны ввиду развития компьютерного оборудования. Например, оптимизации, призванные улучшить передачу информации на оборудовании с установленным оперативно запоминающим устройством (ОЗУ) менее 256 мегабайт. Что по сегодняшним меркам очень мало и даже современные операционные системы не могут запускаться, не говоря уже о полноценном функционировании.

Конечно, совместимость с операционными системами начиная от Windows 95 до Windows 10, это прекрасное достижение не только этого разработчика, но и компании Майкрософт. Собственно, в этом и есть вся проблема: данный инструмент некорректно работает в высоконагруженных задачах. Даже несмотря на обширный функционал, отсутствует поддержка UNIX-подобных операционных систем. Отсутствует возможность работы с другими протоколами кроме SMB, что делает использование данного инструмента невозможным.

Решение NitroShare

Программное решение NitroShare разрабатывается сообществом энтузиастов и является кроссплатформенным решением для передачи файлов между несколькими устройствами. Поддерживает платформы Windows, MAC OS, Linux, а также поддержка Android. Одно из самых продуманных решений для использования в пользовательском режиме – там, где обязательно участие человека для отправки файла. Имеет одноранговую архитектуру (peer-to-peer): каждый участник локальной вычислительной сети является как клиентом, так и сервером. Для создания сети между несколькими устройствами достаточно запустить программу и можно сразу пользоваться. По причине того, что настроек ограниченное количество – это является как плюсом, так и минусом. Удобство пользования – это полноценный плюс, а минусом является то, что отправить или принять информацию с этих устройств не получится, если устройство находится в другой сети. Потому что данный функционал не предусматривает статического указания адресации. Адресация устанавливается в автоматическом режиме в рамках одной сети.

Для использования требуется минимум два устройства с запущенным программным решением. По умолчанию никаких окон не выводится, иконка находится в трее. Для отправки файла требуется выделить нужное количество файлов или каталогов, в контекстном меню отправить через NitroShare (рис. 7).

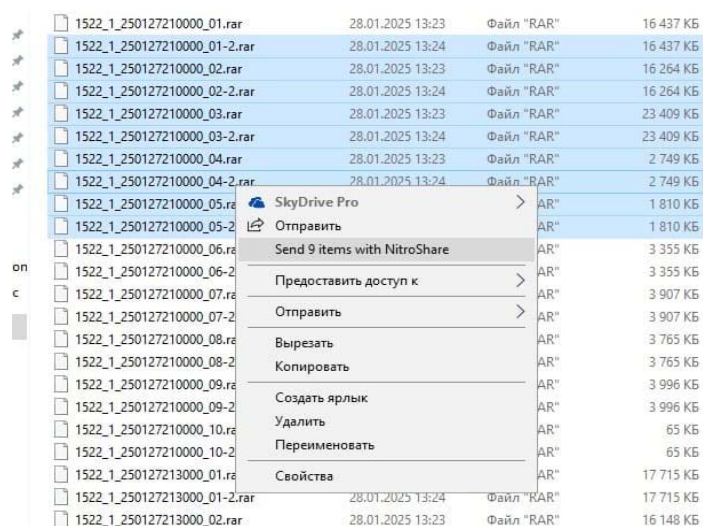


Рис. 7. Контекстное меню nitroshare

После выбора адресата отправка файлов начнется без задействования протоколов кроме собственного, входящего в состав данного инструмента. По результату отправки можно вызвать контекстное меню под названием Transfers, которое выведет окно со статусами заданий (рис. 8).

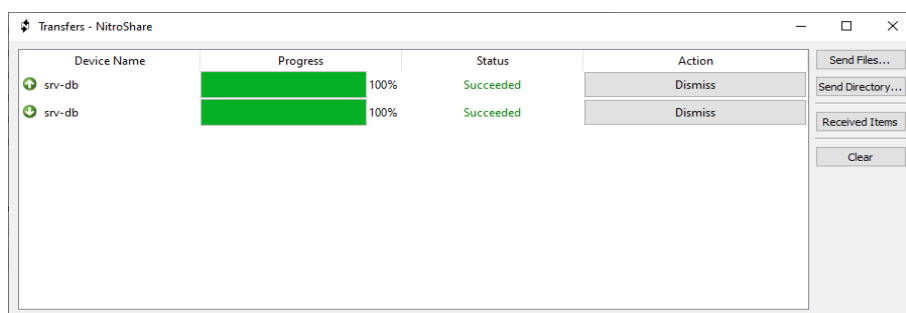


Рис. 8. Окно Transfers Nitroshare

Дополнительные возможности, такие как карантин принятых файлов, перезапись файлов с одинаковыми именами (или к его имени будет прибавляться число). В разделе защита присутствует возможность использования сертификата безопасности TLC, во время передачи информации между несколькими устройствами. Если обмен ключами не произойдет или ключ поменяется, передача информации завершится с ошибкой. В расширенных настройках утилиты присутствует возможность задать порт взаимодействия и размер буфера при отправке файлов. Отдельно хочется отметить возможность использовать рассылку файлов, сразу по нескольким адресатам. В некоторых случаях такая потребность присутствует. Хотя данное решение и является кроссплатформенным оно имеет свои ограничения, свой собственный протокол передачи данных. Поскольку он не стандартизирован, то подойдет не во всех случаях.

Выдвижение альтернативы

Рассмотрев и опробовав существующие альтернативы, оказалось, что ни одна из них не может предоставить требуемый функционал, для обеспечения корректной автоматизированной передачи информации на разных операционных системах с разными протоколами сетевого взаимодействия.

Инструмент должен удовлетворять следующим требованиям:

- возможность использовать разные операционные системы Windows и Linux;
- возможность восстанавливать передачу файла после обрыва соединения;
- возможность использовать несколько модулей с разными протоколами взаимодействия FTP, SMB;
- сжатие информации перед отправкой;
- ведение журналов работы;
- контроль целостности файлов;
- работа в автоматическом режиме;
- поддержка конфигураций запуска с путями передачами и расширениями файлов;
- поддержка флагов передачи: скопировать и удалить, скопировать и оставить;
- отцеживание повторного копирования;
- копирование с расширением «.tmp» на конце имени файла;
- передача одного и более файлов за одну сессию запуска;
- создание каталогов на основании имен файлов.

Разработанный инструмент

Утилита разрабатывалась на Python 3.8, версия была актуальна на момент разработки и удовлетворяла всем требованиям. В первый момент времени была выбрана утилита хсору и вокруг нее была написана обвязка с поиском файлов и прочим. Вызов утилиты выглядел следующим образом:

```
хсору /Y /Z 1522_1_250127210000_03.rar 1522_1_250127210000_03.rar.tmp
```

По происшествии некоторого времени тестирования были выявлены нюансы по скорости, по необъяснимым причинам эта утилита, входящая в состав операционной системы Windows, плохо показала себя. Были ошибки при передаче, вследствие чего было принято решение сменить утилиту и провести тестирование. На этот раз была выбрана похожая утилита, но под названием сору:

```
сору /y /z 1522_1_250127210000_03.rar 1522_1_250127210000_03.rar.tmp
```

Длительное время она успешно работала и проходила тестирование. В операционных системах семейства Linux использовалась схожая по функционалу утилита из свободно распространяемых компонентов. Называется утилита ср, её вызов происходил следующим образом:

ср 1522_1_250127210000_03.rar 1522_1_250127210000_03.rar.tmp
на первое время этого функционала действительно хватало. По происшествии нескольких месяцев тестирования потребовалось, что-то другое.

В качестве варианта была задействована библиотека `shutil` самого языка Python, вызов функции стал выглядеть следующим образом:

```
shutil.copyfile(src, dst, *, follow_symlinks=True)
```

В переменных содержались полные пути до файла источника и до файла приемника. Вариант был рабочий до тех пор, пока не наступила колоссальная нагрузка по передаче и была написана целиком новая функция копирования файлов.

Возвращаясь к разделению программы на отдельные подпрограммы, нужно описать основную функцию. Эта функция отвечает за выборку информации по ключам из конфигурационного файла. Для этого было принято решение стандартизировать конфигурационный файл к следующему виду (рис. 9).

```
Age=5000000
Log=C:\logfile.log
Done=D:/mitter_v3/done.done
MaxDone=50000
SizeControl=yes
From"D:\in\*3721*.jpg"То"D:\R12_1_out\20{3-4}\{5-6}\{7-8}\JPG\"+
From"D:\in\*3721*.jpg"То"D:\_out\20{3-4}\{5-6}\{7-8}\JPG\"-
```

Рис. 9. Пример конфигурационного файла 1.ini

Параметр `Age` отвечает за время создание файла, измеряемое в часах. Если файл создан больше 6,12,24 часов назад, то он не будет обнаружен программой, так-как время его создания превышает условие фильтрации. Параметр `Log` указывает путь сохранения журнала работы лог-файла. Параметр `Done` – указывает полный путь до файла `done`. Файл `done` представляет список с полным именем конкретного файл после копирования. Это делается для того, чтобы один и тот же файл мог скопироваться в разные каталоги, за одну итерацию выполнения программы. Файл `done` имеет следующий вид:

```
/home/dir1/image.jpg
```

```
/home/dir2/image.jpg
```

В примере выше файл «`image.jpg`» был скопировал два раза, и записан был он два раза. Для того чтобы не было повторных копирований, записывается полное имя файла столько раз, сколько он было скопирован. Параметр `MaxDone` – отвечает за максимальное количество строк в файле `done`. Если количество строк превысит введенное значение, то строки начнут стираться с начала файла. Параметр `SizeControl` – отвечает контроль размера файла до копирования и после.

Функция копирования «`copy_file`» обеспечивается копирование файла из заданного источника, в требуемый каталог назначения.

Сам процесс копирования можно разделить на несколько логических операций выполняемых с файлом:

- чтение файла источника по блокам;
- запись файла приемника;
- добавление метки, до которого файл записался в текущий момент;
- повторение чтение и записи файла до тех пор, пока не будет достигнут конец файла;
- переименование файла в его исходное имя без«`.tmp`».

Фрагмент кода представлен на рисунке 10.

В случае если потеряно сетевое соединение, алгоритм действия, следующий:

- прочитать метку недоказанного файла для определения в какой момент произошел обрыв;
- чтение исходного файла с момента обрыва записи файла приемника;
- запись файла приемника;
- повторение чтение и записи файла до тех пока не будет достигнут конец файла.

```
def copy_file(src_file, dest_file, chunk_size=1024 * 1024):
    tmp_file = dest_file + ".tmp"

    if path.exists(dest_file) and path.getsize(src_file) == path.getsize(dest_file):
        print("Файл уже существует и имеет такой же размер.")
        return

    try:
        with open(src_file, 'rb') as fsrc:
            with open(tmp_file, 'ab') as fdest:
                # Сохраняем позицию в исходном файле до которой были скопированы данные
                file_size = fdest.tell()
                fsrc.seek(file_size)

                # Используем tqdm для отображения прогресса копирования в консоли
                from tqdm import tqdm
                with tqdm(total=path.getsize(src_file), initial=file_size, unit='B', unit_scale=True,
                        desc=tmp_file) as pbar:
                    while True:
                        buf = fsrc.read(chunk_size)
                        if not buf:
                            break
                        fdest.write(buf)
                        fdest.flush()
                        pbar.update(len(buf))

    except:
        rename(tmp_file, dest_file)
```

Рис. 10. Функция копирования часть 1

Фрагмент второй части функции, включающий обработку исключений обрыва соединения (рис. 11).

```
except IOError as e:
    if e.errno != errno.EPIPE:
        raise e

    # соединение было прервано
    file_size = path.getsize(tmp_file)
    with open(tmp_file, 'ab') as fdest:
        # Сохраняем позицию в исходном файле до которой были скопированы данные
        fsrc.seek(file_size)

        # Используем tqdm для отображения прогресса копирования в консоли
        from tqdm import tqdm
        with tqdm(total=path.getsize(src_file), initial=file_size, unit='B', unit_scale=True,
                desc=tmp_file) as pbar:
            while True:
                buf = fsrc.read(chunk_size)
                if not buf:
                    break
                fdest.write(buf)
                fdest.flush()
                pbar.update(len(buf))

    rename(tmp_file, dest_file)
```

Рис. 11. Функция копирования часть 2

Обработка регулярных выражений

Как было упомянуто ранее, объем информации очень большой и формат наименований файлов стандартизирован. Для того чтобы не плодить в одной каталоге тысячи и более файлов, их следует определенным образом распределить в специальном хранилище данных. На рисунке 9 используется следующая строка:

From"D:\in*3721*.jpg"To"D:_out\20{3-4}\{5-6}\{7-8}\JPG\".

В ней определен шаблон для поиска файла в исходном каталоге и регулярное выражение, определяющее принцип хранения в каталоге приемника. Для данного правила могут соответствовать файлы следующего стандартно вида:

20250107_3721_01.jpg

Поиск этого файла будет осуществляться по регулярному выражению «*3721*.jpg», символ звездочка может принимать любое количество любых символов. Вторая часть строки выглядит следующим образом:

D:_out\20{3-4}\{5-6}\{7-8}\JPG\"-

Используется для выборки символов «3,4,5,6,7,8» из имени файла «20250107_3721_01.jpg». Файла с таким именем попадет в каталог с именем «2025\01\07\». Что соответствует году, месяцу и дню, в который был принят данный файл. Код функции «regexh1» представлен на рисунке 12.

```
def regexx1(file,path_regex):
    splits = path_regex.split(sep)
    need_regex = []
    for split_part in splits:
        if '{' in split_part and '}' in split_part:
            start_target, end_target = split_part.split('{')[1].split('}')
            start_target = int(start_target)
            end_target = int(end_target)
            need_regex.append(tuple((start_target, end_target)))
        else:
            need_regex.append(False)

    res_arr = []
    for iters, split in enumerate(splits):
        if need_regex[iters]:
            first_reg = split.find('{')
            second_reg = split.find('}')
            new_split = split[:first_reg] + file[need_regex[iters][0] - \
1:need_regex[iters][1]] + split[second_reg + 1:]
            res_arr.append(new_split)
        else:
            res_arr.append(split)

    res = sep.join(res_arr)
    return res
```

Рис. 12. Функция регулярных выражений

На вход функции поступают два параметра, имя файла и его путь назначения.

Ключевыми символами для работы фильтра регулярных выражений функции «regexx1» выступают символы обратный слеш и фигурные скобки «\» «{» и «}».

Строка:

D:_out\20{3-4}\{5-6}\{7-8}\JPG\

делится на сегменты «D:\», «_out\», «20{3-4}», «{5-6}», «{7-8}». Сегменты без фигурных скобок пропускаются. Эти сегменты, с вою очередь, разделяются на одиночные элементы: «3», «4», «5», «6», «7», «8».

После чего каждый элемент заменятся символом порядкового номера, которым он является, на элемент из имени файла «20250107_3721_01.jpg». То есть элементы «3», «4», «5», «6», «7», «8» принимают значение «2», «5», «0», «1», «0», «7» соответственно. После такой нехитрой фильтрации с подстановкой получается строка вида:

D:_out\2025\01\07\JPG\,

в которую позже подставится имя файла и произойдет копирование.

Запуск программы «transmitter_v3.py» можно выполнить в командной строке Windows или в терминале Linux. Для запуска указывается интерпретатор Python, скрипт и конфигурационный файл следующим образом:

python transmitter_v3.py 1.ini

На рисунке 13 представлен запуск и выполнения программы в тестовой среде под управлением Windows.

```
C:\Windows\system32\cmd.exe
C:\tmp\mitter>python transmitter_v3.py 1.ini
Exit 29-01-2025 14:10:54

C:\tmp\mitter>python transmitter_v3.py 1.ini
Start 29-01-2025 14:11:08
248336204
cp \\127.0.0.1\share\1522_1_250127213000_01.L15 to C:\tmp\mitter\out\1522_1_250127213000_01.L15
C:\tmp\mitter\out\1522_1_250127213000_01.L15.tmp: 100%| 248M/248M [00:00<00:00, 714MB/s]
248336204
логирование в файл
248336204
cp \\127.0.0.1\share\1522_1_250127213000_03.L15 to C:\tmp\mitter\out\1522_1_250127213000_03.L15
C:\tmp\mitter\out\1522_1_250127213000_03.L15.tmp: 100%| 248M/248M [00:00<00:00, 424MB/s]
248336204
логирование в файл
15632732
cp \\127.0.0.1\share\1522_1_250127213000_07.L15 to C:\tmp\mitter\out\1522_1_250127213000_07.L15
C:\tmp\mitter\out\1522_1_250127213000_07.L15.tmp: 100%| 15.6M/15.6M [00:00<00:00, 474MB/s]
15632732
логирование в файл
Exit 29-01-2025 14:11:10
```

Рис. 13. запуск transmitter_v3.py на Windows

На рисунке 14 представлен запуск и выполнение в тестовой среде под управление Linux.

Рис. 14. запуск transmitter_v3.py на Linux

В настоящей статье была рассмотрена проблема распределения большого объёма данных, поступающая с двенадцати Российских космических систем. Возникло это по причине того, что в последнее десятилетие группировка космических аппаратов дистанционного зондирования земли стремительно развивается. Суточный объем принимаемой спутниковой информации достиг практически терабайта.

Была выполнена разработка нового программного инструмента, удовлетворяющего всем требованиям. Главные из которых следующие: использование на разных платформах Windows и Linux; докачивание файлов при обрыве соединения между узлами сети; возможность запуска в автоматическом режиме, без необходимости задействовать человеческий ресурс; сортировка файлов по структурным каталогам.

1. Ручкин В.Н., Фулин В.А. Архитектура компьютерных сетей. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2010. 238 с.
2. Максимов Н.В., Попов И.И. Компьютерные сети: учебное пособие. М.: ФОРУМ-ИНФРА-М, 2024. 464 с.
3. Росляков А.В. ОКС №7: архитектура, протоколы, применение. М.: ЭкоТрендз, 2010. 315 с.
4. Утилита FDFSpy [Электронный ресурс] / Сайт VRCР Soft: мультимедийные материалы и статьи. URL: <https://vrcp.ru/fdfspy.html> (дата обращения: 21.01.25).
5. Exiland Backup [Электронный ресурс] / лицензионное программное обеспечение для вашего бизнеса с IСофт : программа для резервного копирования файлов. URL: https://1csoft.ru/exiland_software/exiland-backup (дата обращения: 21.01.25).
6. handybackup [Электронный ресурс] / Программное обеспечение для резервного копирования Handy Backup : Программа копирования файлов Handy Backup Standard. URL: <https://www.handybackup.ru/programma-dlya-kopirovania-failov.shtml> (дата обращения: 21.01.25).
7. KillСору [Электронный ресурс] / Killer{R}. Главная страница: Программа для копирования файлов. URL: <http://www.killprog.com/killcopyr.html> (дата обращения: 21.01.25).
8. NitroShare [Электронный ресурс] / Cross-platform Network File Transfer Application: NitroShare is designed to make transferring files from one device to another extremely simple. URL: <https://nitroshare.net/> (дата обращения: 21.01.25).

НАЗЕМНОЕ FM РАДИОВЕЩАНИЕ В АЗЕРБАЙДЖАНЕ: ШИРИНА СПЕКТРА, ДЕВИАЦИЯ ЧАСТОТЫ, СИСТЕМА RDS

Мамедов Иса Рахман оглы

*Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности, профессор, доктор технических наук,
Баку, Азербайджанская Республика
isamamedov@bk.ru*

Аннотация

В статье исследована адаптация спектра FM радиосигнала к полосе канала радиовещания путем ограничения спектральных составляющих и выбора девиации частоты радиосигнала. Обосновано установление новых радиопередатчиков для обеспечения работы системы RDS и уменьшения помех, связанных с топологией сети.

Ключевые слова

FM радиовещание, канал радиовещания, девиации частоты, индекс частотной модуляции, ширина спектра FM сигнала, функции Бесселя, система RDS.

Введение

6 ноября 1926 г. считается датой начала радиовещания в Азербайджане, поскольку в этот день в Баку было осуществлено первое наземное радиовещание. Вещание осуществлялось по кабельной сети. Впоследствии сеть радиовещания была распространена в других регионах республики. В 1927 г. в городе Баку был введен в эксплуатацию радиовещательный передатчик мощностью 10 кВт. В 1936 г. этот радиопередатчик был заменен длинноволновым радиопередатчиком мощностью 35 кВт [1, 2]. Это обеспечило передачу радиосигналов на большие расстояния, однако длинноволновый радиопередатчик не мог обеспечивать высокое качество вещания.

Переход на средневолновый и коротковолновый диапазоны позволил повысить качество радиовещания. В 1951 г. вблизи города Гянджа был введен в эксплуатацию коротковолновый радиопередатчик мощностью 120 кВт, в 1973 г. в поселке Пирсагат – средневолновый радиопередатчик мощностью 150 кВт, а в 1985 г. средневолновый радиопередатчик мощностью 500 кВт был введен в эксплуатацию в Ханларском радиовещательном центре. Позднее средневолновые радиопередатчики были введены в эксплуатацию на радиостанциях в Ленкорани, Нахичевани и Кубе [2-3]. Применение этих радиопередатчиков позволило передавать радиосигналы на большее расстояние, а также сравнительно повысить качество радиовещания. В указанных диапазонах частот применялась амплитудная модуляция (АМ). Недостатки АМ модуляции общеизвестны. Использувавшиеся в Азербайджане радиочастоты выделены красным на рисунке 1.

Наряду с АМ вещанием в 1970-1980-е г. внедрялось вещание с частотной модуляцией (ЧМ; англ. FM – Frequency Modulation), а также происходил переход с монофонического вещания на стереофоническое [2, 3]. Следует отметить, что в то время наземное FM вещание осуществлялось на ультракоротких волнах в полосе частот 66...74 МГц [2, 4, 5].

Аналоговое телевизионное вещание (ТВ) поначалу осуществлялось на метровых волнах (1...12 каналы телевизионного вещания). На рисунке 2 показаны диапазоны частот ТВ передатчиков и радиопередатчиков УКВ ЧМ.

С 1996 г. в Азербайджане началось наземное FM радиовещание на полосе частот 87,5...108 МГц, которая в настоящее время используется для наземного радиовещания в странах мира. Указанный диапазон частот охватывает 4-й и 5-й каналы телевизионного вещания. По этой причине в республике было прекращено наземное ТВ вещание в диапазоне частот 87,5...108 МГц и в течение последующих трёх лет телевизионное вещание было переведено в дециметровый диапазон волн [4, 5, 6]. Но частоты 87,5 МГц и 108 МГц нельзя выбрать в качестве центральной частоты при наземном FM радиовещании, поскольку в процессе модуляции текущая частота может быть ниже 87,5 МГц в первом случае и выше 108 МГц во втором. Также при этом сигнал не может быть принят стандартными приёмниками радиовещания, в итоге радиостанции будут создавать помехи в соседних каналах.

В 1997 г. впервые в Баку были введены в эксплуатацию FM радиопередатчики мощностью 1 кВт для трансляции радиопрограмм в стереофоническом режиме и в новом диапазоне частот [5]. После этих мер в целях расширения зоны охвата FM радиовещания на региональных радио-телевизионных вещательных станциях Азербайджанской Республики были введены в эксплуатацию FM радиопередатчики, на большинстве станций был обеспечен спутниковый приём сигналов радиовещания.

Амплитудный спектр простого FM-колебания при малом индексе модуляции практически ничем не отличается от амплитудного спектра простого АМ колебания, то есть спектр сигнала при тональной FM модуляции состоит из трёх составляющих: несущей частоты и двух боковых частот. Но фазовый спектр FM-колебаний отличается от фазового спектра АМ колебаний. Из-за различия фазовых спектров FM колебания по форме не соответствуют АМ колебаниям.

Постановка задачи. Наземное FM радиовещание используется уже много лет. Однако определение выходной мощности и мощности излучения радиопередатчиков, работающих в сети, ширина спектра FM радиосигнала, территориально-частотное планирование и оптимизация архитектуры сети и другие аспекты изучаются применительно к каждой стране.

Применение FM-модуляции наряду с другими преимуществами позволяет избавиться от аддитивных помех путём применения простых методов амплитудного ограничения. Особую роль в создании сети наземного радиовещания в Азербайджане играет то, что территория страны небольшая, а рельеф страны специфический.

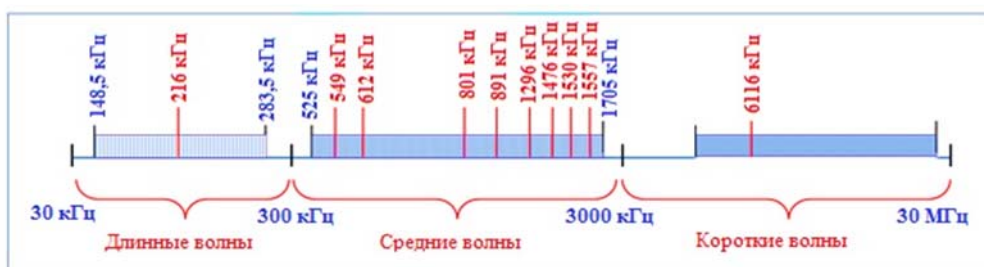


Рис. 1. Радиочастотные диапазоны и рабочие радиочастоты, используемые в Азербайджане для АМ радиовещания до 1996 года

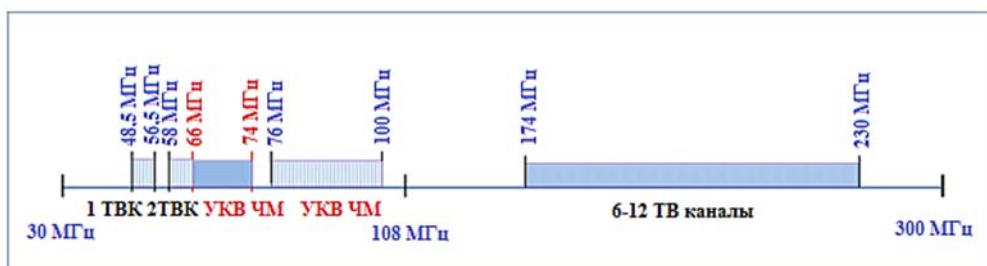


Рис. 2. Полосы частот, в которых работали передатчики аналогового ТВ и УКВ-ЧМ радиовещания в Азербайджане до 1996 года

Использование FM модуляции удобнее при большом индексе модуляции. Но в этом случае спектр FM радиосигнала становится намного шире, и передать радиосигнал с таким широким спектром по каналу вещания невозможно.

Вещание многочисленных радиопрограмм в ограниченном диапазоне частот, обеспечение высокого качества воспроизведения аудиосигналов, покрытие территории вещанием с минимальным возможным количеством и мощностью станций, максимальное сокращение «мёртвых» зон являются целевыми показателями при частотно-территориальном планировании сети радиовещания.

В разных странах выбираются различные значения ширины спектра сигнала FM радиовещания. Необходимо изучить влияние этого параметра на качество воспроизведения сигнала радиовещания.

Однако тот факт, что спектр FM радиосигнала, который выражается функциями Бесселя, очень широк, и что он становится шире с увеличением индекса модуляции, является основным недостатком этой модуляции. Очевидно, что необходимо ограничить такой широкий спектр, то есть подавить составляющие спектра сигнала с FM модуляцией по выбранным процентным ставкам. Но подавление спектральных составляющих приводит к искажению сигнала. Норма искажений рассчитывается теоретически или экспериментально в зависимости от требований к системе и по свойствам передаваемой информации. Представляет интерес определение этого процента.

Также важно определить возможности применения RDS (Radio Data System) при наземном вещании радиопрограмм. В мировой практике RDS является универсальным стандартом. Он служит для передачи сигнала данных по каналу радиовещания и широко используется в автомобильных радиоприёмниках. Местоположение и мощность радиовещательных станций следует выбирать так, чтобы система RDS функцио-

ровала нормально. При этом вдоль автомобильных дорог должно быть обеспечено минимально необходимое значение напряжённости электрического поля. Но этого условия недостаточно для корректной работы системы RDS. Радиоприёмник, настроенный на частоту вещания выбранной программы с определённой станции, должен автоматически переключиться на частоту этой же программы с другой станции в определённой точке при условии корректной работы системы RDS. Однако не исключено, что в этой точке может приниматься сигнал не одной, а от одновременно нескольких станций. Это приведёт к нарушению работы RDS.

Хотя FM радиовещание обеспечивает высокое качество воспроизведения сигнала, это качество может снизиться из-за влияния помех. Следовательно, существует необходимость уменьшить интенсивность помех, связанных с топологией сети. В свою очередь, это требует оптимизации архитектуры вещательной сети, правильного выбора мощности и местоположения станций, минимизации внеполосного излучения, координации радиочастот с соседними странами.

Ограничение спектра FM модулированного радиосигнала рассчитывается по амплитудам боковых составляющих спектра. Этот расчёт проводится в процентном отношении q относительно максимальной амплитуды $U_{\text{макс}}$ (q – может составлять не более 10; 5 или 1% от амплитуды $U_{\text{макс}}$).

Целью статьи является адаптация ширины спектра радиосигнала к выделенной для вещания частотной полосе путем выбора девиации частоты радиосигнала с FM модуляцией и оптимизация структуры сети FM радиовещания для обеспечения корректной работы системы RDS.

Решение задачи. При частотной модуляции колебание с высокой и постоянной частотой преобразуется в колебание, амплитуда которого постоянна, но частота изменяется по закону модуляции. Здесь в результате модуляции происходит общее изменение фазы.

Существует взаимосвязь между частотной и фазовой модуляцией. Когда фаза колебаний изменяется во времени, то его мгновенная частота изменяется по закону производной фазы, а изменение мгновенной частоты колебаний вызывает изменение фазы по закону её интеграла.

В отличие от АМ модуляции здесь амплитуда колебаний центральной частоты очень мала и при определенном значении индекса модуляции (при $M_f = 2,405$) равна нулю [2, 7]. Боковые частоты с обеих сторон центральной частоты имеют один максимум.

При постоянном значении частоты период колебания T определяется как обратное значение этой частоты. Когда частота $f(t)$ является непрерывной функцией времени, функция $1/f(t)$ также является непрерывной, но период T изменяется дискретно [6]. Текущая частота FM колебаний $f(t)$ изменяется за период T . Если представить FM колебания в виде вращающегося вектора, то его угловая частота будет $\omega(t) = 2\pi f(t)$, а период T будет временем, отражающим полный период вектора и показывающим изменение его фазы на 2π .

Если взять начальную фазу $\varphi_0 = 0$, то для тональной частотной модуляции запишем:

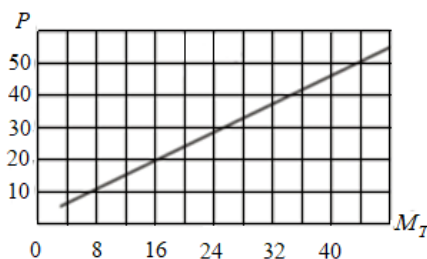


Рис. 3. Зависимость порядка функции Бесселя, соответствующей последней боковой составляющей от индекса модуляции

$$u = U \cos \left(\omega_0 t + \frac{\Delta \omega}{\Omega} \sin \Omega t \right), \quad (1)$$

где U – амплитуда модулированного колебания, ω_0 – его центральная частота, $M_T = \frac{\Delta \omega}{\Omega}$ – индекс частотной модуляции.

При моногармоническом модулирующем сигнале (при тональной модуляции) $s(t) = U_{\Omega} \cos \Omega t$ текущая частота частотно-модулированного сигнала находится по формуле:

$$\omega = \omega_0 + U_{\Omega} \cos \Omega t, \quad (2)$$

где U_{Ω} – амплитуда модулирующего колебания, Ω – угловая частота модулирующего колебания, ω_0 – угловая частота модулированного колебания.

Максимальное значение изменения частоты называется девиацией частоты $\Delta\omega$, где $\Delta\omega = KU_{\Omega}$, K – коэффициент модуляции. Ширину спектра FM колебаний можно рассчитать по следующему выражению [2]:

$$2\Delta\omega_{\Pi} = 2P\Omega, \quad (3)$$

где P – порядок функции Бесселя, соответствующий последней боковой составляющей в спектре FM сигнала.

С увеличением индекса модуляции в амплитудном спектре FM колебаний увеличивается количество и интенсивность различных комбинационных составляющих, амплитуды которых определяются функциями Бесселя. Спектр FM колебаний определен в литературе. Этот спектр состоит из центральной частоты ω_0 и бесконечного количества боковых составляющих с частотами $\omega_0 \pm n\Omega$. Амплитуда центральной частоты определяется выражением $UJ_0(M_T)$ а амплитуда боковых составляющих – выражением $UJ_n(M_T)$, где $J_n(\cdot)$ – функции Бесселя, а M_T – индекс модуляции.

При модуляции полигармоническими колебаниями спектр FM колебаний усложняется. При этом появляются и другие комбинационные составляющие.

Таким образом, частотные составляющие FM модулированных сигналов состоят из сумм функций Бесселя, продолжающихся до бесконечности.

В FM радиовещании полоса частот, выделяемая каждой программе, ограничена, а функции Бесселя продолжают до бесконечности. Поэтому ширина спектра FM-радиосигнала должна быть соответствующим образом ограничена. Известна ширина полосы частот, выделенная каждой радиопрограмме в FM радиовещании. В частности, в Азербайджане выделенная полоса частот равна 300 кГц, в Грузии – 250 кГц, в Турции – 200 кГц. Зная ширину спектра модулирующего аудио сигнала и ширину полосы частот для одной программы FM-радиовещания, можно по известным выражениям рассчитать процент ограничения частотных составляющих для заданного значения девиации частоты. В литературе приведены зависимости $P = f(M_T)$ для различных значений процента ограничения. Используя эти зависимости, можно рассчитать ширину спектра FM сигнала.

На рисунке 3 представлена зависимость $P = f(M_T)$ при $q = 5\%$. Используя эту зависимость, порядок функции Бесселя, соответствующей последней боковой составляющей, вычисляется следующим образом [3]:

$$P_{5\%} = 1,1M_T + 2,5. \quad (4)$$

Учитываем выражения $M_T = \frac{\Delta\omega}{\Omega}$, $\Delta f = \Delta\omega / 2\pi$ и $F = \Omega / 2\pi$ в формуле (4). Тогда можно вывести выражение для расчета ширины спектра FM сигнала при поставленных условиях [3]:

$$2f_{\Pi} = 2,14\Delta f + 4F. \quad (5)$$

Выражение (4) справедливо для $q = 5\%$. Аналогично и для других значений q можно вывести выражение для вычисления порядка функции Бесселя, соответствующей последней боковой составляющей, используя соответствующие зависимости. Например, используя эти зависимости при $q = 1\%$ получим [3]:

$$P_{1\%} = 1,125M_T + 3. \quad (6)$$

Далее можем написать следующее выражение для расчета ширины спектра FM колебаний при $q = 1\%$:

$$2f_{\Pi} = 2,25\Delta f + 6F. \quad (7)$$

Из выражений (5) и (7) видно, что ширина спектра FM сигнала зависит от максимальной частоты модулирующего колебания (аудио сигнала) и девиации частоты. Рассчитанные значения ширины спектра FM колебаний при известных значениях максимальной частоты модулирующего колебания и девиации частоты для различных значений q приведены в таблице 1.

Таблица 1

Ширина спектра FM сигнала при монофоническом радиовещании

№		$2f_{\Pi}, \text{кГц}$		
		$q = 1\%$	$q = 5\%$	$q = 10\%$
		$2f_{\Pi} = 2,25\Delta f + 6F$	$2f_{\Pi} = 2,2\Delta f + 5F$	$2f_{\Pi} = 2,14\Delta f + 4F$
1	$\Delta f = 75 \text{ кГц};$ $F = 5 \text{ кГц}$	198	190	180,5
2	$\Delta f = 100 \text{ кГц};$ $F = 10 \text{ кГц}$	285	270	254
3	$\Delta f = 150 \text{ кГц};$ $F = 15 \text{ кГц}$	427,5	405	381

Из таблицы видно, что для вышеуказанных трех значений q ширина спектра FM сигнала уже полосы, отведенной для FM радиовещания в республике при выборе $\Delta f = 100 \text{ кГц}$ и $F = 10 \text{ кГц}$. Но расчеты показали, что если выбрать $F = 15 \text{ кГц}$ и $q = 5\%$, то ширина спектра FM сигнала составит $2f_{\Pi} = 295 \text{ кГц}$ при $\Delta f = 100 \text{ кГц}$, то есть ширина полосы спектра FM сигнала будет соответствовать полосе частот, отведенной для наземного FM радиовещания на территории Азербайджанской Республики.

Эти расчёты могут применяться в монофоническом FM радиовещании. В настоящее время аудио сигнал в современном FM радиовещании включает в себя монофонический звуковой сигнал, а также пилот-сигнал с интенсивностью 10% от максимального значения, стерео звуковой сигнал (для правого и левого трактов) и сигнал RDS на поднесущей частоте (рис. 4). Сигнал RDS модулируется по амплитуде. Частота поднесущего колебания составляет 57 кГц. Поэтому спектр модулирующего сигнала значительно расширяется [7, 8]. Кроме того, в современном FM радиовещании в составе модулирующего сигнала могут передаваться закодированные дополнительные сигналы данных в полосе частот 58,65...100 кГц. Это приводит к дальнейшему расширению спектра модулирующего сигнала [3, 8, 9].

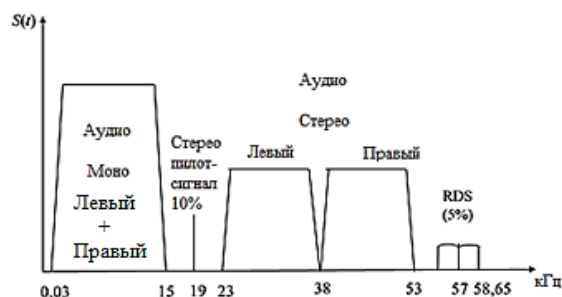


Рис. 4. Спектр моно- и стереосигнала вместе с сигналом RDS в FM радиовещании



Рис. 5. Изменение напряженности электрического поля FM радиостанции “İctimai Radio” по трассе Аксу-Баку

Учитывая такой спектральный состав модулирующего сигнала, вычислим ширину спектра модулированного FM сигнала для различных значений глубины модуляции и q . Полученные значения занесём в таблицу 2. В таблице 2 приведены значения ширины спектра FM радиосигнала при девиации частоты 40 кГц и 75 кГц и максимальной частоте модулирующего сигнала $F = 58,65$ кГц. $F = 58,65$ кГц.

Таблица 2

Ширина спектра FM сигнала при моно- и стереофоническом радиовещании с применением RDS

№		$2f_H, \text{кГц}$		
		$q = 1\%$	$q = 5\%$	$q = 10\%$
		$2f_H = 2,25\Delta f + 6F$	$2f_H = 2,2\Delta f + 5F$	$2f_H = 2,14\Delta f + 4F$
1	$\Delta f = 40 \text{ кГц};$ $F = 58,65 \text{ кГц}$	441,4	381,25	320,2
2	$\Delta f = 75 \text{ кГц};$ $F = 58,65 \text{ кГц}$	520,65	458,25	395,1

Из таблицы видно, что в рассматриваемых условиях ширина спектра FM радиосигнала значительно больше ширины полосы частот, отведённой для этого радиовещания в Азербайджане. Сравнительно близкой к этой полосе является полоса частот 320,2 кГц, рассчитанная для $q = 10\%$ и $\Delta f = 40 \text{ кГц}$. Однако в данном случае необходимы некоторые уточнения. Для этого следует либо уменьшить девиацию частоты, либо увеличить значение q . Однако дальнейшее увеличение значения q приводит к ещё большему искажению спектра сигнала и дальнейшему ограничению энергии сигнала. Следовательно, если немного уменьшить девиацию частоты, то можно уменьшить полосу частот до 300 кГц. Расчёты показали, что ширина частотного спектра FM радиосигнала составит 300 кГц при девиации частоты $\Delta f = 30,56 \text{ кГц}$ и $q = 10\%$.

В настоящее время в FM радиовещании в Азербайджане применяется система RDS. Были проведены эксперименты с целью оценки работы системы RDS на автодорогах республики. По итогам экспериментов были выявлены места прерывания сигналов RDS, составлен проект расширения сети FM радиовещания страны, принято решение о постройке дополнительных радиовещательных станций и корректировке мощности действующих радиовещательных станций. В результате была обеспечена нормальная работа системы RDS.

На рисунке 5 представлен график, показывающий измеренные значения напряжённости поля по трассе Аксу-Баку. На рисунке разными цветами показаны измеренные значения напряжённости электрического поля для “İctimai Radio”. Здесь зелёный цвет соответствует максимальному значению напряжённости поля, а красный цвет – минимальному значению напряжённости поля. После проведения вышеупомянутых мероприятий выяснилось, что, хоть напряжённость поля вдоль трассы и находится на разных уровнях, в целом значение напряжённости электрического поля вдоль дороги оказывается выше минимально необходимого значения. Это говорит о том, что вдоль трассы работу системы RDS можно считать приемлемой.

На рис. 5 показано изменение уровня сигнала RDS в прямом и обратном направлениях вдоль трассы Баку-Аксу. Из рисунка видно, что уровень сигнала RDS по этой автодороге находится на необходимом уровне. Аналогичный результат получен и для других автомагистралей республики.

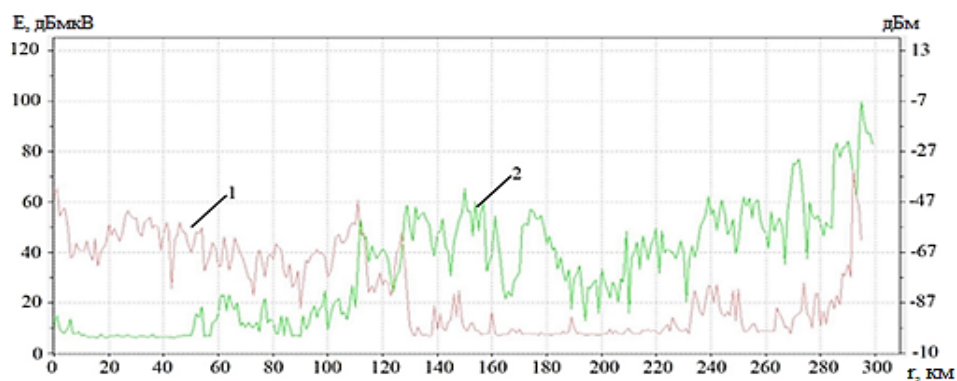


Рис. 6. Изменение уровня сигнала RDS по направлению Баку – Аксу (график 1) и Аксу – Баку (график 2)

Заключение

Подбирая девиацию частоты и учитывая максимальную частоту модулирующего аудио сигнала в современном радиовещании, следует адаптировать ширину спектра FM сигнала к полосе радиочастот, выделенной для радиовещания. Поскольку спектр модулирующего сигнала в современном FM радиовещании широк, девиация частоты радиосигнала в Азербайджане должна составлять 30,56 кГц для уровня ограничения боковых частотных составляющих $q = 10\%$.

Обеспечить работу системы RDS и уменьшить помех, связанных с топологией сети FM радиовещания, удалось за счет установки дополнительных передатчиков радиовещания в различных регионах Азербайджанской Республики.

Литература

1. Мамедов И.Р., Ахадов И.Д., Шарифов А.М., Аббасов М.Г. Цифровое телевидение: Формирование и передача сигнала. Баку: Азернешр, 2010. 150 с.
2. Мамедов И.Р., Ахадов И.Д., Аббасов М.Г. Современное состояние и направления развития радиочастотных диапазонов наземного телевидения в Азербайджане/Азербайджанская Республиканская НТК «Современные проблемы радиотехники», Баку, 2021. С. 91-95.
3. Мамедов И.Р., Ахадов И.Д., Аббасов М.Г. Современное состояние и направления развития полос радиочастот, выделенных для наземного радиовещания в Азербайджане /Азербайджанская Республиканская НТК «Современные проблемы радиотехники», Баку, 2021. С. 96-99.
4. URL: <http://www.teleradio.az>
5. URL: <http://www.dri.az>
6. Мамедов И.Р., Шарифов А.М., Аббасов М.Г. Устойчивость приема сигналов цифрового ТВ вещания при воздействии мешающих сигналов/Международная НТК «Современные телевидение и радиоэлектроника», Москва, 2015. С. 31-34.
7. Мамедов И.Р. Цифровое и кабельное телевидение. Учебник. Баку: Мутарджим, 2021. 204 с.
8. Елисеев, С.Н. Оценка величины мощности межканальной помехи OFDM сигнала в канале с быстрыми замираниями // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 4. С. 59-62.
9. Kassan K., Fares H., Chistian D., Louet Y. Performance vs spectral properties for single-side-band continuous phase modulation//IEEE transaction on Communication. 2021. v. 69(7), pp. 4402-4416.

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВНЕДРЕНИЯ ГИБРИДНЫХ СТАНДАРТОВ ТЕЛЕВЕЩАНИЯ

Свистунов Виталий Николаевич

*Московский технический университет связи и информатики,
аспирант кафедры цифровой экономики, управления и бизнес-технологий, Москва, Россия,
vitaliy@svistunov.ru*

Аннотация

В статье рассматривается влияние интернет-технологий на индустрию телевидения, предпосылки и экономические аспекты перехода на гибридные стандарты телевидения (на примере DVB-I). Описано ключевое преимущество линейного телевидения, взаимосвязь с мобильным телевидением, стратегия перехода к гибридным форматам, преимущества и финансовые сложности внедрения технологии 5G Broadcasting. Предложены бизнес-модели монетизации контента для телевизионных компаний.

Ключевые слова

бизнес-модель, стратегия, гибридное телевидение, DVB-I, 5G Broadcasting, форматы телевидения.

Введение

В последние десятилетия информационные технологии стремительно развиваются, и это существенно меняет мир, в котором мы живём. Эти изменения проявляются в разных сферах, они влияют не только на коммуникации и характеристики информационных потоков, но и на хозяйственную деятельность и бизнес-процессы в различных отраслях. Развитие интернет-технологий оказало масштабное воздействие на индустрию телевизионного вещания, вызвав значительные изменения в ней. Компании, предоставляющие видеоконтент, сталкиваются с необходимостью поиска оптимальной бизнес-модели, которая позволит им максимизировать прибыль в условиях увеличения аудитории пользователей и расширения ассортимента доступного контента.

Доминирующее положение традиционного телевидения как основного источника информации, культурного, образовательного и развлекательного контента ставится под сомнение в связи с появлением и развитием интернета. Благодаря своим уникальным свойствам, интернет оказывает влияние как на технические, так и на экономические аспекты индустрии вещания.

В условиях активного развития цифровых технологий в сфере телевизионного вещания возникла необходимость в разработке и уточнении методов передачи сигналов по различным каналам.

Например, в Европе эту задачу взял на себя консорциум DVB Project, который представил новый стандарт для так называемого «гибридного» телевидения, получивший название DVB-I (цифровое видеовещание - интернет) [1]. Это инновационное решение было обусловлено рядом факторов:

- увеличением скорости мобильных интернет-соединений;
- ростом количества мобильных устройств и другой бытовой электроники, в особенности - появлением смарт-телевизоров;
- возникновением цифровых видеосервисов, таких как видео по запросу (VOD) и услуги интернет-телевидения over-the-top (OTT), которые не зависят от традиционных операторов связи.

Ранее в работе [2] уже были сформулированы преимущества от внедрения гибридных стандартов в телевидении для различных участников телевизионного рынка. В настоящей работе рассмотрены основные экономические аспекты при переходе на такие стандарты. Показано ключевое преимущество линейного вещания, на базе которого будут строиться пользовательские сервисы и бизнес-модели. Рассмотрена стратегия перехода к интерактивному вещанию на примере внедрения стандартов мобильного телевидения в разных странах. Изучена перспектива использования сетей 5G как платформы для доставки телесигналов на различные устройства. В заключении данной статьи предложено внедрение инновационного стандарта DVB-I в качестве гибридной модели традиционного и интернет-вещания.

Непрерывность как ключевое преимущество линейного телевидения

В контексте гибридного телевидения необходимо выделить ключевое преимущество традиционного линейного вещания, которое заключается в его способности служить платформой для объединения телевизионных программ. Это позволяет зрителям ориентироваться в многообразии контента, предоставляемого вещателями в различных каналах, в том числе и в интернет-сервисах видео-по-запросу (VOD).

Последовательность телевизионного вещания определяет доминирующую бизнес-модель отрасли, основанную на рекламных вставках. Однако сейчас телевизионная индустрия вынуждена адаптироваться к новым тенденциям в просмотре контента. Различные видеосервисы и социальные сети вносят свой вклад в этот процесс, предоставляя зрителям возможность обходить традиционные телевизионные каналы и получать доступ к контенту напрямую с их устройств.

Линейность телевещания остаётся важным фактором привлечения зрителей [3] и может сохранить свою актуальность как телевизионный феномен, несмотря на вызовы, связанные с развитием интернет-технологий. Телекомпании стремятся найти баланс между линейным и нелинейным программированием, создавая новую модель, которая будет свидетельствовать о переходе к новой парадигме в телевизионной индустрии.

Учёным необходимо восполнить пробел в изучении связи телевизионных линейных подходов и новых нелинейных моделей. Это позволит рассматривать развитие телевидения в контексте более широких медиасистем.

Стратегия перехода к гибриднему телевидению

Эволюция цифрового телевидения представляет собой последовательность этапов, каждый из которых характеризуется определёнными исследованиями, опытно-конструкторскими работами над экспериментальными устройствами и системами. Каждый этап также включает в себя разработку соответствующих стандартов.

На первом этапе происходило внедрение цифровых технологий в отдельные компоненты телевизионных систем при сохранении аналоговых каналов связи. На втором этапе были созданы системы аналого-цифрового телевидения, параметры которых отличались от традиционных телевизионных стандартов. Третий этап характеризовался разработкой полностью цифровых телевизионных систем. Так, например, в России с 2018 года осуществляется наземное цифровое телевидение по стандарту DVB-T2 [4].

В качестве примера перехода к гибриднему цифровому и интернет-вещанию можно рассмотреть международные тенденции на рынке мобильного телевидения, которые характеризуются разнообразием бизнес-моделей, появлением новых услуг и изменением предпочтений пользователей. Авторы исследования [5] проанализировали эволюцию рынка услуг мобильного телевидения, уделяя особое внимание моделям и стандартам, которые были внедрены на некоторых рынках, такие как DVB-H, MediaFLO, ISDB-T, T-DMB и S-DMB.

Япония стала одним из лидеров в области услуг мобильного телевидения, основанного на стандарте ISDB-T. Его бизнес-модель была интегрирована в инфраструктуру традиционного телевизионного вещания и предоставлялась бесплатно.

Южная Корея занимала второе место по темпам роста рынка мобильного телевидения, уже в 2009 году количество подключенных к нему устройств составляло около 10 миллионов. На корейском рынке конкурировали две бизнес-модели: бесплатная услуга T-DMB, предоставляемая шестью вещательными компаниями, и платная услуга S-DMB, предоставляемая крупным оператором мобильной связи SK Telecom.

В Соединённых Штатах Америки был утверждён и внедрён стандарт MediaFLO, разработанный компанией Qualcomm. Он был доступен на условиях подписки у двух операторов — AT&T и Verizon Wireless. В то же время, для расширения аудитории пользователей мобильного телевидения в США коалиция Open Mobile Video заявляла внедрению нового стандарта ATSC-M/H и предоставлении бесплатного мобильного телевидения.

В европейских странах активно разрабатывался стандарт мобильного телевидения DVB-H. Он был призван обеспечить вещательным компаниям возможность передавать цифровые телевизионные программы и предоставлять новые услуги на мобильных и портативных устройствах. Данный стандарт поддерживает разнообразные возможности, включая предоставление бесплатного телевидения, интерактивных услуг, телевидения по подписке и возможность загрузки контента в виде файлов.

В Европе операторы мобильной связи активно применяли стандарт DVB-H. Так в Финляндии компания Digita получила лицензию на сеть DVB-H еще 2006 году, а в Италии с 2008 года на базе этого стандарта внедрены бесплатные услуги мобильного телевидения.

В рамках исследования [5] были выявлены ключевые региональные особенности потребления мобильного телевидения и использования портативных устройств. Эти факторы оказали значительное влияние на динамику распространения мобильного телевидения по всему миру. Эти особенности должны быть учтены операторами связи, вещательными компаниями и производителями оборудования для успешного внедрения гибридного телевидения.

Было обнаружено, что способы потребления мобильного телевидения различаются в зависимости от региона. В Италии 60% пользователей смотрят телевизор на улице, преимущественно в рамках своей профессиональной деятельности. В Австрии более 50% предпочитают смотреть телевизор дома. Также многие смотрят телевизор в общественном транспорте. В Южной Корее и Японии просмотр телевизионных программ является неотъемлемой частью повседневной жизни. Зрители не расстаются любимыми передачами как дома, так и на улице, в офисах и даже в метро. В Корее 18% зрителей предпочитают смотреть телевизор в автомобилях, в то время как в Японии 40% смотрят его дома.

Исследования, проведённые в Европе, свидетельствовали о готовности потребителей оплачивать услуги мобильного телевидения. В таких странах, как Италия и Австрия, наблюдался высокий спрос на подписку. Однако модель бесплатного доступа быстрее завоёвывала популярность среди пользователей. Спросом пользовались общедоступные бесплатные телеканалы, такие как ORF 1 в Австрии, MTV3 и NELONEN в Финляндии.

В азиатском регионе исследования показали, что клиенты не готовы платить за услуги. Опрос пользователей T-DMB в Корее показал, что 67% респондентов отказались бы от услуги, если бы она предполагала оплату.

Рассматривая опыт извлечения выручки вещательных компаний на рынке мобильного телевидения, можно выделить несколько основных направлений:

- Предоставление бесплатных и платных каналов премиум-класса. Это позволяет вещателям предлагать широкий спектр контента, удовлетворяя потребности как широкой аудитории, так и более взыскательных зрителей.
- Исследование новых форм рекламы и кросс-медийного маркетинга. Мобильное телевидение предоставило вещателям возможность экспериментировать с новыми способами привлечения рекламодателей и продвижения своих услуг через различные каналы коммуникации.

На примере внедрения мобильного телевидения хорошо просматривается проблематика, с которой сталкиваются все участники рынка в процессе перехода на новые стандарты вещания. Перед ними стоят ключевые задачи, связанные с контентом и управлением цифровыми правами, бизнес-моделями и стоимостью услуг, техническими стандартами и удобством их использования.

Применение сетей 5G в телеиндустрии

Важным фактором перехода к гибридному телевещанию может стать широкое распространение сетей 5G. Сегодня Китай и Южная Корея занимают лидирующие позиции в сфере внедрения технологий пятого поколения связи. Эти государства уже давно приступили к тестированию 5G. Согласно оценкам экспертов, в Китае функционирует 70% всех базовых станций стандарта 5G в мире. В Южной Корее, по прогнозам аналитиков, к 2026 году 90% населения будут пользоваться услугами связи пятого поколения. По данным Ассоциации GSM, 89 операторов в 44 странах запустили автономные сети 5G. К 2025 году доступ к пятому поколению связи будет в каждой третьей стране, а половина населения планеты будет использовать сети 5G [6].

В Российской Федерации процесс внедрения сетей пятого поколения связи (5G) всё ещё находится на стадии эксперимента. Крупнейшие участники рынка телекоммуникаций иницируют пилотные проекты в различных отраслях, стремясь оценить экономическую выгоду от использования технологии 5G. Однако, в соответствии с планами Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций, в скором времени сети пятого поколения будут развёрнуты во всех городах-миллионниках. Поэтому в последнее время в научных кругах России активно обсуждается возможность использования технологии вещания через сети мобильной связи пятого поколения (5G Broadcast) [7].

Реализация инвестиционного проекта по внедрению сетей 5G требует значительных финансовых вложений со стороны государства и мобильных операторов. В России действуют строгие нормативы СанПиН, которые отличаются от европейских в 10 раз. Это приводит к необходимости установки большого количества базовых станций мобильными операторами. Согласно «дорожной карте» развития 5G-сетей в России, до конца 2024 года планировалось направить 208,13 млрд рублей на эти цели.

Планы по развитию сетей 5G подразумевали закупку дорогостоящего иностранного оборудования, что достаточно сложно сделать в текущих условиях внешних экономических санкций в отношении РФ. Поэтому сейчас прослеживается тенденция к монополизации процесса проектирования и изготовления отечественного телекоммуникационного оборудования для сетей пятого поколения со стороны государственных корпораций.

Анализ цифровой трансформации телевещания [8] позволяет выявить ключевые тенденции и перспективы развития цифрового эфирного телевидения. Среди них можно выделить следующие:

- создание гибридных сетей, объединяющих возможности эфирного вещания и сетей 5G в рамках технологии 5G Broadcast. Это позволит осуществлять интерактивную передачу мультимедийного контента на мобильные и стационарные устройства;

- обеспечение доставки данных каждому пользователю (unicast) с широковещательной многоадресной доставкой (multicast, broadcast);

- использование технологии 5G Broadcast для развития линейного вещания наряду с DVB;
- переход на IP-платформу и интеграция с интернет-сервисами;
- трансляция программ в формате сверхвысокой чёткости;
- возможность мобильного приёма сигналов средств массовой информации, развлечений, а также общественных услуг и сигналов оповещения на смартфоны и устройства Смарт ТВ.

Технологии 5G Broadcast обладают внушительными технологическими преимуществами: высокая пропускная способность, низкая задержка, мобильность и масштаб сети. Это позволяет предоставлять абонентам мультимедийные услуги более высокого качества, значительно увеличить интерактивность контента и открывать новые горизонты для создания уникальных гибридных телеформатов, например, с использованием стандарта DVB-I [9].

DVB-I – современный стандарт гибридного телевидения

Спецификация DVB-I (Digital Video Broadcasting – Internet) [10] представляет собой инновационное решение, которое открывает перед вещательными компаниями и операторами цифрового телевидения новые горизонты в области потоковой передачи контента через интернет. Благодаря стандартизации подходов, они смогут с лёгкостью доставлять контент на разнообразные устройства, включая эфирные, кабельные и спутниковые каналы вещания, а также через современные интернет-протоколы.

Интернет предоставляет более интерактивные возможности взаимодействия с пользователем по сравнению с традиционным телевидением. DVB-I открывает перед зрителями дополнительные перспективы взаимодействия с контентом, предоставляемым провайдерами и вещательными компаниями. В частности, стандартизированная аутентификация пользователей и персонализированный просмотр делают просмотр более удобным и индивидуальным.

Кроме того, DVB-I поддерживает электронные программы передач (EPG) и предоставляет расширенные сервисы для поставщиков контента, что значительно расширяет возможности для пользователей.

Пилотные проекты, основанные на технологии DVB-I, были успешно реализованы в Германии, Ирландии, Испании и Италии [11]. Эти проекты наглядно демонстрируют потенциал данной технологии для улучшения пользовательского опыта и предоставления новых возможностей для доставки контента и взаимодействия с ним.

Заключение

Подводя итоги, можно сделать вывод, что в условиях современного развития индустрии телевидения и потокового видео, а также их интеграции, становится необходимым поиск новых подходов к ведению бизнеса, направленных на поддержание и расширение клиентской базы.

На будущее цифровых телевизионных сервисов оказывают влияние несколько ключевых факторов:

- рост стоимости подписок и насыщение рынка;
- кризис в творческих индустриях, вызванный увеличением затрат на производство профессионального видеоконтента и угрозами, связанными с контентом, созданным с помощью искусственного интеллекта.

Внедрение новых стандартов, таких как DVB-I, открывает перед вещателями новые перспективы для монетизации контента. На начальном этапе телевизионные компании могут проявить гибкость, адаптируясь к уже существующим бизнес-моделям на рынке интернет-услуг и совершенствуя их.

Модель рекламных вставок, использующая возможности интернет-доставки, позволяет сделать таргетированную рекламу более доступной и эффективной. Рекламодатели могут динамически включать персонализированные рекламные блоки, учитывая предпочтения, демографические данные и привычки зрителей. Такой подход делает коммуникацию более актуальной и способствует повышению вовлечённости аудитории, а также окупаемости маркетинговых затрат рекламодателей.

Телевизионные вещатели также могут использовать различные модели получения дохода, связанные с доступом к контенту, такие как подписка, плата за просмотр и другие. Возможные бизнес-модели в гибридном телевидении были рассмотрены ранее в работе [12].

В данной статье мы проанализировали экономические аспекты перехода на гибридное телевидение и выявлены факторы, способствующие такому переходу. Определены преимущества и различные бизнес-модели для телевизионных компаний. Это открывает перспективы для дальнейших исследований в области цифровой трансформации телевизионной индустрии.

Литература

1. DVB-I initiative launched // URL <https://dvb.org/news/dvb-i-initiative-launched/> (дата обращения: 20.01.2025).
2. Гумеров М.Ф., Свистунов В.Н. Перспективы использования в России формата гибридного телевидения на примере стандарта DVB-I // Мобильный бизнес: перспективы развития и реализации систем радиосвязи в России и за рубежом : Сборник материалов (тезисов) 53-й Международной конференции, Москва, 22 апреля 2024 г. М.: Национальный институт радио и инфокоммуникационных технологий, 2024. С. 91-93. EDN GWDPRY
3. Bruun Hanne. The delay economy of “continuity” and the emerging impatience culture of the digital era. // Nordic Journal of Media Studies (2019). № 1. С. 85-101.
4. Андрейко Д.Н., Якушкина Н.П. Переход на цифровое телевизионное вещание в Российской Федерации // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2010. №9.
5. Windekilde Iwona, Falch Morten. Mobile TV broadcasting - What will be the underlying business model in the future? // WIRELESS VITAE. 2009. С. 639-643.
6. С поправкой на частоту: почему Россия отстает в деле внедрения 5G. // Телеспутник. [Электронный ресурс]. URL: <https://telesputnik.ru/materials/tech/article/s-popravkoj-na-chastotu> (дата обращения: 20.01.2025).
7. Быструшкин К. 5G Broadcast – новый локомотив развития телевидения? // Телеспутник. [Электронный ресурс]. URL: <https://telesputnik.ru/materials/tech/article/5g-broadcast-novyy-lokomotiv-razvitiya-televideniya/> (дата обращения: 20.01.2025).
8. Фомина А.Н. Развитие инновационных технологий 5G в телеиндустрии: проблемы и перспективы // Вопросы инновационной экономики. 2022. Том 12. № 1. С. 449-462. doi: 10.18334/vinec. 12.1.114389
9. Tkachenko D., Popov E., Vargauzin V. Combination of 5G Broadcast and DVB-I Technologies for Unified Access to TV Services // 2024 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), Saint Petersburg, Russian Federation, 2024, pp. 227-230, doi: 10.1109/EExPolytech62224.2024.10755843.
10. Digital Video Broadcasting (DVB); Service Discovery and Programme Metadata for DVB-I Services // URL https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a177_dvb-i_specification.pdf (дата обращения: 20.01.2025)
11. Remo Vogel. The German DVB-I Pilot – evaluating DVB-I on a national scale // DVB Scene. 2022. № 60, pp. 6-7.
12. Гумеров М.Ф., Свистунов В.Н. Развитие бизнес-моделей цифровых сервисов для просмотра видеоконтента // Мобильный бизнес: перспективы развития и реализации систем радиосвязи в России и за рубежом / Сборник материалов (тезисов) 52-й Международной конференции, Москва, 01-03 ноября 2023 г. М.: АО "Национальный институт радио и инфокоммуникационных технологий", 2023. С. 78-80. EDN: UMSUWK