

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

**СИСТЕМЫ синхронизации,  
формирования и обработки  
сигналов**

№2-2023 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*

**Казakov 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 Паблшер»*

*Номер подписан в печать 21.04.2023 г.*

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Ванина М.Ф., Ерохин А.Г., Фролова Е.А.</b> <b>СКОРИНГ КАК ИННОВАЦИОННЫЙ ИНСТРУМЕНТ МАРКЕТИНГА</b>	<b>4</b>
<b>Григорьев Д.А., Горохводацкий И.Б.</b> <b>МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДА СЖАТИЯ ВИДЕОСИГНАЛА СВЕРХВЫСОКОЙ ЧЕТКОСТИ С УЛУЧШЕНИЕМ КАЧЕСТВА КОМПЕНСАЦИИ ДВИЖЕНИЯ</b>	<b>13</b>
<b>Гусева О.А., Раковский Д.И., Симонян А.Г.</b> <b>ПРЕДОБРАБОТКА ДАННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ МЕТОДОМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ</b>	<b>20</b>
<b>Осипов Г.Л., Панкратов Д.Ю.</b> <b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАДИОКОНТРОЛЯ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ СОТОВОЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ МАСОК</b>	<b>25</b>
<b>Санников В.Г., Волчков В.П.</b> <b>ФОРМИРОВАНИЕ БИПОЛЯРНЫХ СИГНАЛОВ, НЕ ВЫЗЫВАЮЩИХ ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ В ЛИНЕЙНОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ</b>	<b>31</b>
<b>Федоров В.Д., Кудряшов В.В., Власюк И.В.</b> <b>МЕТОДОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СВЕТ-СИГНАЛ</b>	<b>39</b>
<b>Шерстнева А.А., Шерстнева О.Г.</b> <b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЦОВ</b>	<b>47</b>

## СКОРИНГ КАК ИННОВАЦИОННЫЙ ИНСТРУМЕНТ МАРКЕТИНГА

**Ванина Маргарита Федоровна,**

*Московский технический университет связи и информатики, доцент, кандидат технических наук,  
доцент, Москва, Россия*  
[margo.vanina2012@yandex.ru](mailto:margo.vanina2012@yandex.ru)

**Ерохин Андрей Густавович,**

*Московский технический университет связи и информатики, доцент, кандидат технических наук,  
доцент, Москва, Россия*  
[andrew145@yandex.ru](mailto:andrew145@yandex.ru)

**Фролова Елена Александровна,**

*Московский технический университет связи и информатики, старший преподаватель,  
Москва, Россия*  
[EFrolova@me.com](mailto:EFrolova@me.com)

### **Аннотация**

*Компании в процессе своего функционирования регулярно собирают большие объемы данных по контактам. При этом всегда встает проблема правильной обработки и использования собранных данных для построения грамотной маркетинговой кампании. Одним из передовых инструментов для этого является предиктивная аналитика, в основе которой лежит технология искусственного интеллекта. Предиктивная аналитика позволяет анализировать огромный массив данных и за секунды строить на их основе прогностические модели. В настоящей статье рассмотрена возможность применения предиктивной аналитики для решения задач маркетинга. Рассматриваются как традиционные инструменты, такие, как A/B тестирование, так и инновационные, к которым относится скоринг. Проводится сравнительный анализ этих инструментов. Показаны основные преимущества и недостатки обоих подходов.*

**Ключевые слова:** *Маркетинг, аналитика, скоринг, большие данные, искусственный интеллект, задачи классификации, информационная система*

### **Введение**

Современные методы сбора и хранения информации позволяют компаниям накапливать большие объемы данных, которые в дальнейшем используются в тех или иных процессах. Но чтобы управлять процессом, недостаточно регистрировать информацию о нем, сами по себе данные не дают никакой информации о причинах их появления. Для построения грамотной маркетинговой кампании необходимо оснастить компанию аналитическими показателями ее работы. Современная предиктивная аналитика и скоринг данных, в основе которых лежит технология искусственного интеллекта, позволяют за секунды анализировать огромный массив данных. Правильная обработка накопленных данных с использованием инструментов предиктивной аналитики обеспечивает построение прогностических моделей достаточной точности. В текущих условиях растущей конкуренции компаниям важно максимально быстро и качественно оценивать клиентов. Предиктивный маркетинг означает использование больших данных в процессе построения прогнозов успешности тех или иных маркетинговых мероприятий, дальнейшее планирование и реализация этих мероприятий компанией и тем самым получение конкурентного преимущества.

В основе предиктивного маркетинга лежит, в первую очередь, предиктивная аналитика, подразумевающая работу с выборками данных в целях определения паттернов, позволяющих с большой долей вероятности утверждать, что то или иное событие в будущем будет иметь место. Второй важный компонент предиктивного маркетинга – инструменты, позволяющие быстро внедрять модификации, планировать и запускать кампании, основанные на полученных прогнозах. Предиктивный анализ использует статистические алгоритмы и методы машинного обучения для определения вероятности будущих результатов на основе прошлого состояния системы. Его цель состоит в том, чтобы выйти за рамки того, что произошло, и дать наилучшую оценку событий в будущем.

Преимущества предиктивной аналитики:

- снижение рисков при принятии решений;
- оптимизация ресурсов;
- повышение эффективности кампании;
- повышение конкурентоспособности;
- улучшение процесса принятия решений.

Можно выделить следующие этапы предиктивной аналитики:

1. Определение цели анализа. Результаты этого этапа влияют на выбор параметров для сбора.
2. Сбор первичных данных. На этом этапе компании собирают все данные, которые они считают полезными, в качестве исходных данных для своих проектов. Поскольку обработка данных является сущностью предиктивной аналитики, выбор правильных типов, объемов и источников данных имеет решающее значение для положительного результата.

3. Формирование модели. Моделирование — это основная часть проекта по анализу данных. Этот процесс относится к созданию и расширению моделей данных, которые определяют, как организация должна собирать, обновлять и хранить данные. Модели используются для понимания логики данных и формулирования прогнозов на основе сделанных выводов.

4. Практическое использование. Данный этап посвящен практическому использованию подготовленной модели. На данном этапе модель собирает данные и строит прогноз на основании полученной информации.

Предиктивная аналитика - перспективный инструмент, который может изменить привычные бизнес-процессы маркетинга, поскольку способен брать данные о прошлом состоянии системы и использовать их для прогнозирования будущего. Предиктивная аналитика может обеспечить более глубокое понимание бизнес-процессов как в случае традиционного, так и цифрового маркетинга, позволяя более точно формировать потребительские профили клиентов, превентивно выявлять ценных клиентов и применять точные маркетинговые методы, которые обеспечат более высокую рентабельность инвестиций в маркетинговые усилия [1].

Предиктивная аналитика - перспективный инструмент, который может изменить привычные бизнес-процессы маркетинга, поскольку способен брать данные о прошлом состоянии системы и использовать их для прогнозирования будущего. Предиктивная аналитика может обеспечить более глубокое понимание бизнес-процессов как в случае традиционного, так и цифрового маркетинга, позволяя более точно формировать потребительские профили клиентов, превентивно выявлять ценных клиентов и применять точные маркетинговые методы, которые обеспечат более высокую рентабельность инвестиций в маркетинговые усилия [1].

В качестве статистического метода предиктивная аналитика доказала свою применимость в различных сферах бизнеса. Так, без скоринга (оценки платёжеспособности потенциального заёмщика) в настоящее время не обходится ни один серьёзный банковский кредит [2].

Машинное обучение [3, 4] является одним из инструментов предиктивной аналитики. Применение предиктивной аналитики средствами машинного обучения позволяет: автоматизировать работу с большими объемами информации, минимизировать «человеческий фактор», компенсировать недостаток опыта и отраслевой экспертизы, более точно «предсказывать» будущее поведение клиентов, на основании имеющихся данных, быстрее принимать обоснованные решения.

Маркетинг сегодня персонализирован, динамичен и обладает свойством контекстуальности. Все чаще его цель не привлечение клиентов, а понимание каждого конкретного пользователя на уровне его желаний и контекста потребления. Предиктивная аналитика в данном случае как раз помогает предугадать тот самый контекст потребностей и желаний клиентов и определить лучший способ доставки информации через физические и цифровые точки соприкосновения, выстроив при этом уникальный персонализированный подход.

В основе предиктивной аналитики лежит технология искусственного интеллекта. Она позволяет анализировать огромный массив данных и за секунды строить на их основе прогностические модели. Основными компонентами предиктивной аналитики являются сбор данных, исследовательский анализ данных и предиктивное моделирование.

Одним из широко известных применений предиктивной аналитики является кредитный скоринг. Модели скоринга обрабатывают кредитную историю, займы, потребительские данные и другие сведения и дают оценку потенциального заёмщика с точки зрения перспективной платёжеспособности и прогноза своевременности выплат по кредиту. В настоящее время механизмы скоринга могут применяться практически в любых направлениях банковской деятельности, страховых компаниях, среди мобильных операторов.

Перспективы для широкого использования скоринга есть в маркетинговом бизнесе. Раньше при скоринге анализировались, прежде всего, социальные данные (пол, возраст, семейное положение) и демография (регион, район). Сейчас появился огромный пласт дополнительных сведений (геолокация, активность в социальных сетях, личные предпочтения, покупательское поведение и т. д.). Все

они помогают бизнесу более точно определять и таргетировать своих потенциальных клиентов с использованием скоринга [5].

Скоринг (от англ. *scoring*, подсчет очков в игре) – это модель классификации клиентской базы на различные группы. При этом характеристика, которая разделяет эти группы, неизвестна, но известны другие факторы, связанные с интересующей нас характеристикой. Чем больше параметров, тем точнее оценка. Скоринговый балл – непостоянная величина, он может меняться с течением времени. Поэтому при каждом обращении к скорингу важно пересчитывать оценку.

Можно выделить следующие этапы построения скоринга:

- определение интересующей характеристики;
- сбор второстепенных сведений о клиентах;
- разработка скоринговой модели (присвоение весов второстепенным данным) на основе имеющихся данных;
- автоматическое ранжирование новых клиентов по приоритетным группам посредством скоринговой модели.

Одним из современных подходов к решению задач скоринга являются алгоритмы машинного обучения. Машинное обучение считается ветвью искусственного интеллекта, основная идея которого заключается в том, чтобы компьютер не просто использовал заранее написанный алгоритм, а сам обучился решению поставленной задачи. Задача машинного обучения — это тип прогноза или вывода, основанный на возникшей проблеме или на вопросе, а также доступных данных.

Использование скоринга для определения лучшего времени отправки маркетинговых кампаний относится к наиболее популярной задаче машинного обучения – задаче классификации, а именно, получение категориального ответа на основе набора признаков. В рамках задачи по определению наилучшего времени отправки маркетинговых кампаний такой классификации будут подвергнуты клиенты по таким признакам как количество коммуникаций и временное поведение клиента [6].

Схематично процесс классификации представлен на рисунке 1. В качестве примера здесь рассмотрена задача определения: относится ли письмо к спам-рассылке или нет.

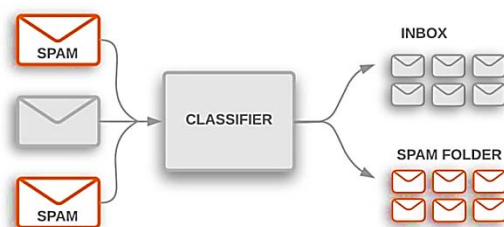


Рис. 1. Пример процесса классификации

Таким образом, классификация посвящена решению следующей задачи: имеется множество объектов (ситуаций), разделённых, некоторым образом, на классы. Задано конечное множество объектов, для которых известно, к каким классам они относятся. Это множество называется обучающей выборкой. Классовая принадлежность остальных объектов не известна. Требуется построить алгоритм, способный классифицировать произвольный объект из исходного множества.

За счет использования машинного обучения предиктивная аналитика позволяет классифицировать базу клиентов на основе любого количества переменных. С помощью этих данных компания получает на порядок больше возможностей для кросс-сейла и апсейла, улучшая тем самым клиентский опыт и увеличивая прибыль компании.

Чтобы предиктивная аналитика была максимально эффективной, не стоит ставить перед анализом множество ключевых характеристик, лучше сконцентрироваться на чем-то одном, например, «увеличение открываемости писем».

В текущих условиях растущей конкуренции компаниям важно максимально быстро и качественно оценивать клиентов. Критерии оценки, которым подвергается клиент, различаются в зависимости от задачи и для каждой из них необходим свой инструмент. В настоящее время самым распространенным инструментом является скоринг, построенный под те или иные нужды.

Рассмотрим следующую ситуацию. Пусть на предприятии имеется информационная система, осуществляющая взаимодействие с клиентами. Существующую информационную систему представляется возможным усовершенствовать благодаря внедрению нового подхода к отправке email компаниям. Таким вариантом усовершенствования может стать использование предиктивной аналитики с созданием модели скоринга для анализа собранной клиентской базы компании. Мощный аналитический инструмент позволит в полном объеме использовать накопленный объем информации по клиентам. Классификация контактов осуществляется на основании скоринговой карты, с помощью которой рассчитывается скоринговый балл конкретного человека.

Предлагаемая архитектура информационной системы представлена на рисунке 2.

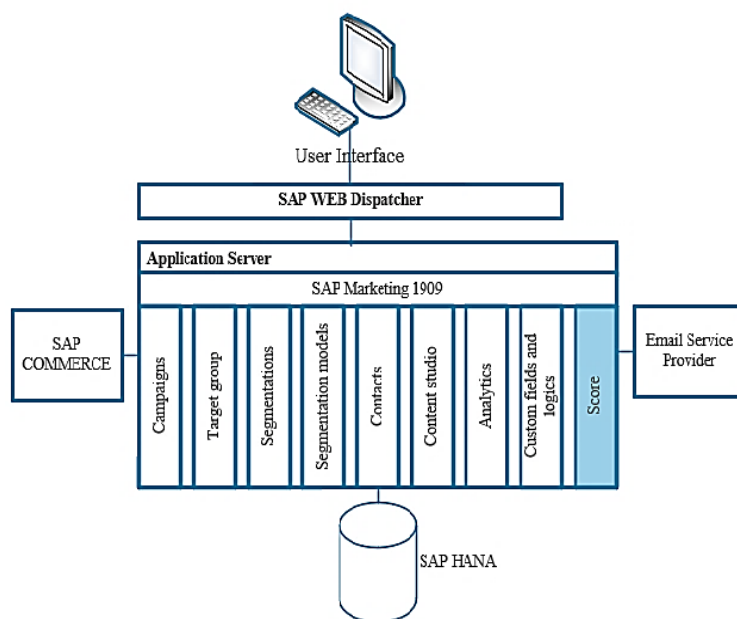


Рис. 2. Предлагаемая архитектура информационной системы

Функциональный блок Скоринг (Score) выполняет анализ информации по контактам в базе данных компании и производит расчет и присвоение балла скоринга для каждого клиента. Это позволит маркетологу настраивать собственные скоринги в зависимости от целей и требований, которые применяются для желаемой оценки.

В предлагаемом бизнес-процессе с использованием скоринга настраивается алгоритм (модель), по которому клиентам будут присваиваться определенные скоринговые баллы, и которые в свою очередь будут определять наилучшее время отправки email коммуникации. В качестве показателей алгоритма определяется следующая информация:

- наличие более 3 взаимодействий клиента «Email открыто»;
- наличие email у клиента;
- подписка клиента на email рассылку;
- время, когда клиент открывал email.

Каждому правилу алгоритма присваивается конкретный коэффициент скоринга, которому соответствует определенное время. Например, в случае, когда у клиента менее 3 взаимодействий «Email открыто», настраивается отдельное правило, по которому клиенту может присваиваться любой скоринговый балл (в зависимости от решения маркетолога). В зависимости от поведения клиента с появлением достаточного количества взаимодействий с ним значение присвоенного балла изменится на корректное значение.

Интеграция результатов скоринга с бизнес-процессом, когда маркетологам становится доступным новый функционал, имеет следующие достоинства:

- более грамотное управление запуском маркетинговых кампаний;
- повышение качества маркетинговых рассылок;
- отсутствует необходимость дополнительного сбора данных;

- рост положительного отношения к компании со стороны потребителей;
- укрепление доверия к маркетингу со стороны руководства;
- отсутствие необходимости серьезной перестройки устоявшегося бизнес-процесса;
- отсутствие необходимости дополнительного обучения персонала;
- возможность более глубокого анализа клиентской базы и повышение конкурентоспособности предприятия.

Но имеются и недостатки, в частности:

- отсутствие стопроцентной гарантии результатов скоринга, так как точность прогнозов зависит от качества собранных данных в системе;
- процесс принятия решения все также является ручным, что не исключает риск ошибочного суждения.

Таким образом, можно сделать вывод, что данный подход не требует крупных вложений для внедрения, а также серьезного изменения бизнес-процесса.

Сравним возможности использования скоринга в маркетинговом бизнесе с А/В-тестированием, как с еще одним популярным способом решения проблемы управления маркетинговыми кампаниями.

А/В-тестирование — это метод маркетингового исследования, суть которого заключается в том, что контрольная группа элементов сравнивается с набором тестовых групп. В этих группах, один или несколько показателей изменяются для того, чтобы выяснить, какие из изменений улучшают показатели эффективности маркетинговой кампании. Основные проблемы, которые помогает решить А/В-тестирование:

- лучшее понимание контактов и предложения релевантного предложения;
- исключение риска и субъективности при принятии решения;
- концентрация ресурсов на том, что является более подходящим для аудитории.

Процесс использования А/В-тестирования для определения наилучшего времени отправки заключается в следующем (рис. 3):

- формирование гипотезы;
- определение измеряемых показателей;
- определение размера целевой и контрольной группы;
- планирование и запуск кампании;
- анализ полученных результатов;
- определение лучшей характеристики;
- повторение итерации.

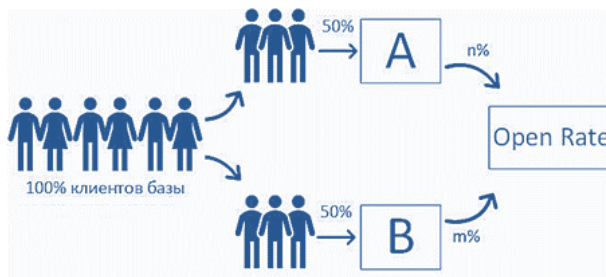


Рис. 3. Схема А/В тестирования

После проведения первой итерации А/В тестирования проводится следующая итерация в рамках другого временного промежутка. Данные шаги повторяются до того момента, пока не будет выбрано наилучшее время отправки коммуникации.

Для получения достоверных результатов при использовании А/В тестирования важно избегать следующих ошибок:

1. Выделение для тестирования недостаточного количества времени. Выполнение тестирования в слишком короткий промежуток времени может привести к неверным результатам. Например, не все контакты могли успеть среагировать на рассылку и при досрочном завершении теста, часть данных окажется не учтенной.



2. Выделение неоднородных контактных групп. Тестирование даст более достоверную информацию, если целевые группы будут сформированы по схожим признакам. Например, некорректно сравнивать одну целевую группу, состоящую из девушек, и другую – состоящую в основном из мужчин в процессе тестирования косметического предложения. Во втором случае вероятность прочтения клиентом электронного сообщения, даже если оно замечено в почтовом ящике, достаточно мала.

3. Разовое тестирование. А/В тестирование — это итерационный процесс, где каждое новое тестирование основано на результатах предыдущей итерации. Нет гарантии, что выдвинутая гипотеза подтвердится, но не стоит останавливать тестирование при неудаче. При продолжении тестирования повышается вероятность получения оптимального результата.

Использование А/В тестирования для определения лучшего времени отправки маркетинговых кампаний также имеет и ряд недостатков:

- нельзя достоверно утверждать, что результат тестирования будет работать всегда, ведь на результат тестирования влияет не только внутренняя среда (время отправки, контент), но и внешняя, не зависящая от конкретной рассылки;
- результаты тестирования имеют свойство устаревать и, соответственно, для постоянного применения полученных результатов тестирования его необходимо периодически повторять для обновления показателей.

Отсюда следует вывод, что А/В-тест представляет собой долгий и сложный процесс, со множеством препятствий.

В таблице 1 приведен сравнительный анализ скоринга и А/В-тестирования. Можно сделать вывод, что хотя А/В-тестирование и представляет собой популярный метод анализа клиентской базы, но его невозможно использовать для решения ряда поставленных проблем. В рамках современного динамического рынка приоритетом является умение быстро перестраиваться и подстраиваться под изменяющиеся условия, так как время открытия писем субъективно для каждого клиента и может меняться с течением времени.

Таблица 1

Сравнение А/В тестирования и скоринга

	Скоринг	А/В-тестирование
Охват клиентской базы	Полностью	Полностью
Результаты применения метода	Сразу, после определения весов и показателей	После проведения ряда тестирований
Методы для расширения ИС	Настройка нового приложения	Добавление новых полей в сегментацию
Обработка полученных результатов	Автоматически	Автоматически
Возможность изменения ключевых показателей	Да. Необходимо перенастроить алгоритм скоринга	Да. Необходимо провести ряд дополнительных тестирований
Индивидуальный подход	Да	Нет
Автоматический анализ данных	Да	Нет
Необходимость привлечения дополнительных ресурсов на постоянной основе	Нет	Да
Возможность применения результатов исследования в будущем	Да, результаты автоматически пересчитываются	Да, но требуются дополнительные затраты на обновление результатов
Место применения метода	В рамках кампании	В рамках кампании
Вероятность ошибочного определения времени	Исключена, оценка строится на основании данных клиентов	Есть, так как выбор времени отправки для каждой группы клиентов происходит вручную
Настройка кампании	Активация функционала по выбору времени отправки в рамках кампании	Настройка блоков для А/В тестирования на этапе настройки кампании

Для того, чтобы понять будут ли рациональными изменения в рамках процесса отправки email кампаний, проведем расчет основных показателей эффективности кампании на примере одной из текущих email кампаний.

*Open Rate* - это процент открытых писем в e-mail маркетинге. Это одна из самых важных метрик в e-mail-маркетинге, по которой можно судить, насколько рассылки интересны пользователям (1).

$$OpenRate = \frac{\text{количество\_открытых\_писем}}{\text{количество\_доставленных\_писем}} \cdot 100\% \quad (1)$$

В таблице 2 представлены показатели открытых и доставленных писем в разрезе каждого часа, а также рассчитанный показатель Open Rate. В целом, для понимания общей эффективности кампании, нет необходимости подсчитывать количество доставленных и открытых писем в разрезе каждого часа. Данная детализация необходима для того, чтобы понять соотношение количества доставленных писем к количеству открытых. По результатам такого детального анализа можно будет сделать вывод о поведении клиентов.

Таблица 2

Распределение по времени доставки и открытия писем

Время	Количество достав- ленных писем	Количество откры- тых писем	Open Rate
00:00	3777	3910	104%
01:00	876	3550	405%
02:00	136	5563	4090%
03:00	332	11292	3401%
04:00	163	18826	11550%
05:00	271	28489	10513%
06:00	56897	36935	65%
07:00	327026	46888	14%
08:00	461225	54082	12%
09:00	627578	65597	10%
10:00	814617	80916	10%
11:00	870747	87460	10%
12:00	861028	94690	11%
13:00	760471	96291	13%
14:00	516775	90017	17%
15:00	376431	83249	22%
16:00	226947	77800	34%
17:00	53027	71234	134%
18:00	32659	65193	200%
19:00	7266	54882	755%
20:00	3757	40259	1072%
21:00	4617	23598	511%
22:00	6709	12000	179%
23:00	6654	5994	90%

Таким образом, можно заметить, что в существующей модели отправки писем показатель Open Rate распределен достаточно неравномерно. Для случаев, когда показатель больше 100% очевидно, что контакты читают «старые» письма, т. е. отправка писем для данных клиентов была проведена в то время, когда контакты не могли сразу прочитать письмо.

В таблице 3 представлен анализ того, в какое время чаще всего контакты открывают письма, и сопоставление полученных данных с данными по отправке писем.

Данное сравнение показывает, что пик, когда контактам была доставлена почта в рамках кампании, не совпадает с пиком, когда контакты привыкли работать с почтой. Следовательно, каким бы ни

было правильным и цепляющим письмо, если письмо пришло не вовремя, его вряд ли откроют. Возможно, о нем вообще забудут в череде дел и потоке других писем.

По формуле (1) рассчитывается общий показатель Open Rate:

$$OpenRate = \frac{6019986}{1158715} \cdot 100\% = 19\%$$

Общий показатель Open Rate равен 19%, что свидетельствует о том, что контакты открывают каждое пятое письмо, которое им было отправлено.

Таблица 3

Сопоставление данных по отправке писем и данных по контактам

Время	Кол-во доставленных писем	Кол-во контактов, которые открывают письма в данное время
00:00	3777	204080
01:00	876	86210
02:00	136	40890
03:00	332	252453
04:00	163	22768
05:00	271	34567
06:00	56897	85410
07:00	327026	250844
08:00	461225	265790
09:00	627578	298640
10:00	814617	325585
11:00	870747	307813
12:00	861028	319230
13:00	760471	368220
14:00	516775	499753
15:00	376431	387500
16:00	226947	371600
17:00	53027	343698
18:00	32659	393394
19:00	7266	366128
20:00	3757	260870
21:00	4617	238110
22:00	6709	182855
23:00	6654	113578

### Заключение

На основании проделанного анализа рациональности применения скоринга можно утверждать, что наиболее целесообразным решением, для улучшения работы email рассылок является коммуникация с клиентом тогда, когда ему удобно. Индивидуальный подход является тонкой настройкой времени отправки коммуникации на уровне контакта. При этом для анализа и вычисления такого времени используется колоссальный объем данных, который не всегда под силу проанализировать вручную. Использование скоринга для определения лучшего времени отправки email позволяет справиться с поставленной задачей. Оценка «лучшего времени» позволит определить, в какое время дня контакт открывал больше всего писем в прошлом. Будущие электронные письма можно будет отправлять в это пиковое время, поэтому электронные письма будут отображаться поверх почтового ящика контактов, когда они его откроют [7].

Отправка электронных писем в пиковое время в свою очередь позволяет улучшить общую скорость отклика на электронные письма. Преимуществом перед конкурентами является «просчитывание» деятельности на несколько шагов вперед, а индивидуальный подход обеспечит высокую лояль-

ность клиентов. Это приведет к увеличению прибыли компании и росту доверия к маркетингу со стороны руководства.

### Литература

1. Брускин С. Н. Методы и инструменты продвинутой бизнес-аналитики для корпоративных информационно-аналитических систем в эпоху цифровой трансформации // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2016. Т. 12. № 3-1. С. 234-239.
2. Ерохин А.Г., Стуколова А.А., Стуколов С.С. Роль скоринга в управлении маркетинговыми кампаниями предприятия // Труды международной научно-технической конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы 2020». М.: Горячая линия – Телеком, 2020. С. 754-760.
3. Ерохин А.Г., Ванина М.Ф. Повышение эффективности бизнеса компании на основе технологий Big Data и Machine Learning // Сборник трудов XIV Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества». (18-19 марта 2020 г. Москва, МТУСИ). М.: ИД Медиа Паблицер, 2020. С. 336-338.
4. Ерохин А.Г., Ванина М.Ф. Data Scientist и Machine Learning: интеграция подготовки специалистов IT-направлений и бизнес-технологий // Сборник трудов XIV Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества». (18-19 марта 2020 г. Москва, МТУСИ). М.: ИД Медиа Паблицер, 2020. С. 558-560.
5. Системы управления эффективностью бизнеса / под науч. ред. Н. М. Абдикеева и О. В. Китовой. М.: Инфра-М, 2014. (Серия «Научная мысль»).
6. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных / пер. с англ. А. А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2015. 400 с.
7. Bryan Foss, Merlin Stone, Yuksel Ekinici. What makes for CRM system success – or failure? [Эл. ресурс]. URL: <https://link.springer.com/article/10.1057/dbm.2008.5> (дата обращения 11.11.2023).

## МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДА СЖАТИЯ ВИДЕОСИГНАЛА СВЕРХВЫСОКОЙ ЧЕТКОСТИ С УЛУЧШЕНИЕМ КАЧЕСТВА КОМПЕНСАЦИИ ДВИЖЕНИЯ

**Григорьев Дмитрий Александрович,**

*Московский Технический Университет Связи и Информатики, Москва, Россия*  
[dog.alpha@bk.ru](mailto:dog.alpha@bk.ru)

**Гороховацкий Иван Борисович,**

*Московский Технический Университет Связи и Информатики, Москва, Россия*  
[van55@yandex.ru](mailto:van55@yandex.ru)

### **Аннотация**

*Использование алгоритмов сжатия цифрового видеосигнала позволяет существенно (в десятки и более раз) снизить требования к объему памяти и каналам передачи данных универсальных электронно-вычислительных машин, обеспечивающих запись и воспроизведение видеоинформации (к ним относятся современные персональные компьютеры, ноутбуки, смартфоны, неттопы и т.д.), а также специализированных электронно-вычислительных систем, предназначенных для работы с сигналами телевидения высокой четкости (цифровые видеокамеры, телевизионные устройства с поддержкой ТВЧ, спутниковые ресиверы и т.д.). Изначально (начиная с 1988 г.) были разработаны алгоритмы H.261, MPEG-1, MPEG-2, MPEG-3, MPEG-4 [1], обеспечивающие существенное сжатие видеосигнала и снижение требований к каналам передачи данных. Дальнейшее развитие вычислительной техники привело к появлению мобильных вычислительных устройств, а также мобильных (беспроводных) сетей передачи данных. Одновременно повысились и требования к разрешению изображения. Скорость передачи данных у мобильных сетей передачи данных существенно ниже, чем у проводных, также объемы накопителей информации меньше, чем у стационарных ПК и ноутбуков. Это предопределило дальнейшее развитие алгоритмов сжатия и привело к созданию нового формата MPEG-H и кодеков, основанных на компенсации движения. Эти кодеки позволяют существенно (еще в два раза) сократить объем передаваемых видеоданных, что существенно снижает нагрузку на мобильные сети передачи данных. Степень сжатия для этих кодеков составляет 80 и более раз при сохранении качества изображения. Такая высокая степень сжатия достигается за счет специальных алгоритмов предсказания движения, что позволяет минимизировать информацию о движущихся объектах по сравнению с младшими форматами (например, MPEG-4). По этой причине данные кодеки используются, например, в системах видеонаблюдения. Дальнейшее совершенствование кодеков направлено на снижение требований к затратам аппаратных вычислительных ресурсов. В статье рассмотрен кодек H.266 и проведен его сравнительный анализ с предыдущими кодеками для работы с HD – это H.264 и H.265. На основе этого кода мы начали модернизацию нового метода сжатия видеосигнала UHD с улучшенной компенсацией движения. Приведены доказательства работоспособности предложенного метода на примере модели кода, реализованной в среде MatLAB R14 Simulink.*

**Ключевые слова:** Кодирование видеосигналов, H.265, H.266, кодек, MPEG

### **Введение**

Обзор и анализ современных программных инструментов для реализации методов сжатия цифрового видеосигнала (кодеков видеосигнала). Необходимость сжатия видеосигнала возникла практически одновременно с внедрением цифровых методов обработки, хранения и передачи видеосигнала. Необходимость создания и возможность дальнейшего развития методов сжатия цифрового видеосигнала и, соответственно появления новых современных решений для сжатия цифрового видеосигнала и воспроизведения сжатого видеосигнала (кодеков) обусловлены следующими двумя обстоятельствами:

1) Ограниченные возможности средств хранения и передачи цифровых данных при повышении стандартных требований к качеству изображения. (если стандарт аналогового телевидения 626 строк, то в телевидении высокой четкости количество строк может быть 2160 и более, также повышаются требования к цветопередаче, т.е. к количеству бит на один пиксель). Объемы несжатого видеосигнала близки к предельным возможностям существующих и перспективных средств хранения и передачи цифровых данных.

2) Повышение производительности вычислительной техники. сжатие видеосигнала – вычислительный процесс, требующий большой производительности ЭВМ. Появление современных технологий позволяет обеспечить работу алгоритмов кодирования и декодирования с приемлемой скоростью. Более того, это справедливо и для мобильных (практически) карманных устройств, которые в настоящее время повсеместно используются для работы с видеосигналом (съемки, воспроизведение, передача и т.д.). Для воспроизведения сигнала требуется практически работа в режиме реального времени.

Объем информации несжатого видеосигнала очень велик. Можно утверждать, что даже современных носителей информации едва бы хватило для хранения нескольких часов видео, тогда как современные алгоритмы сжатия позволяют обеспечить сжатие в десятки раз. Чтобы оценить этот объем, возьмем для примера видеосигнал UHD 4k (телевидение высокой четкости). Для данного стандарта предполагается стандартное разрешение кадра 3840x2160 пикселей и цветовая глубина 3 байта (24 бита) на пиксель. Для целостного восприятия видеоряда в движении необходимо демонстрировать не менее 24-х последовательно сменяющихся друг друга [7].

В настоящее время используются алгоритмы сжатия, позволяющие сократить объем часового видео 4K до нескольких гигабайт, и эти алгоритмы постоянно развиваются и совершенствуются. Необходимость дальнейшего совершенствования этих алгоритмов и разработки новых кодеков (о которых и пойдет речь в данной статье) в немалой степени связана с повсеместным распространением сетей с относительно низкой скоростью передачи информации – мобильных интернет-сетей. Применение новых кодеков позволяет пользователем мобильных коммуникаторов (т.н. смартфонов) скачивать и смотреть видеоролики с приемлемой скоростью.

### Результаты исследований

Далее рассмотрим особенности построения существующих современных кодеков и их сравнение с самым совершенным из них на сегодняшний день кодеком H.266.

Все алгоритмы сжатия видеосигнала используют следующие его фундаментальные свойства:

1) Объем статичного кадра можно значительно уменьшить, убрав данные о «мелких» деталях, о незаметных глазу цветовых переходах, о повторяющихся элементах изображения. При этом визуальное качество кадра не пострадает. Информация же о повторяющихся элементах изображения записывается в более компактной форме с использованием алгоритмов, основанных на использовании дерева Хаффмана.

2) При передаче видеоряда многие элементы кадра остаются статичными, соответственно объем повторяющихся данных о неподвижных элементах кадра также можно существенно уменьшить оставив информацию о движении отдельных элементов кадра, а данные о повторяющихся элементах записать в более компактной форме. При этом потери информации, существенной для восприятия видеоряда зрителем, практически не произойдет;

3) При кодировании движущихся элементов кадра можно выделить определенные законы движения и, пользуясь математическими (в частности, вероятностными) методами, предсказать закон движения отдельных элементов кадра, тем самым, еще больше сократив объем результирующего кадра. При качественном предсказании законов движения динамика изображения будет естественной, без рывков.

Первые два свойства реализованы в существующих кодексах с форматом сжатого видеосигнала MPEG-1, MPEG-2, а свойство 3 частично реализовано в MPEG-4, отличающемся от первых двух существенно большей степенью сжатия, а дальнейшее развитие кодеков видеосигнала идет по пути совершенствования использования свойства 3 – восстановления и «предсказания» законов движения отдельных движущихся элементов кадра.

Современные кодеки, рассматриваемые в данной статье, реализуют алгоритмы кодирования в стандарте MPEG-N. (H.264 и выше) Этот стандарт является преемником широко распространенного стандарта MPEG-4 и имеет следующие преимущества по сравнению с MPEG-4:

- 1) работа только с целыми числами, что обеспечивает побитовую идентичность видео при декодировании декодерами разных производителей;
- 2) адаптивное разбиение потока на макроблоки (от 4x4 до 16x16) при компенсации движения;
- 3) 6-ти точечный фильтр компенсации движения;
- 4) арифметическое сжатие энтропии;

- 5) долго-хранящиеся опорные кадры, гибкое управление опорными кадрами;  
6) число векторов на макроблок, поддерживается гибкая работа с цветовыми разрешениями, число бит на компонент – 8.

Кодеки H.264 и выше используют ряд типов кадров:

I-кадры - Опорные или ключевые кадры (англ. Intra-coded frames) которые содержат информацию только о статичных объектах.

P-кадры - предсказанные кадры, которые также называют разностными (англ. Predicted frames) . – эти кадры содержат сведения об изменяющихся элементах видеоряда, а также ссылки на соответствующие опорные кадры

Двунаправленные предсказанные кадры B-кадры (англ. Bi-predicted frames) — в отличие от P-кадров, могут ссылаться на I-, P- и даже другие B-кадры, причем как на предыдущие, так и на последующие.

Предсказанные кадры и двунаправленные предсказанные кадры формируются на основе обработки предыдущих кадров и текущих разностных кадров и формирования законов, описывающих взаимосвязь движущихся элементов – этот процесс носит название алгоритмов компенсации движения и его реализация в значительной мере предопределяет возможности кодека.

Кодек H.265 позволяет сократить в два раза степень сжатия по сравнению с H.264 [4]

Подробная спецификация кодека H.265 дана в [3]. Упрощенная структура кодера HEVC H.265, которую будем рассматривать как базовую (кодер AVC H.264 хотя и является распространенным, эволюционно вытесняется H.265 и более старшими версиями, поддерживающие большие разрешения ТВЧ) представлена на рисунке 1.

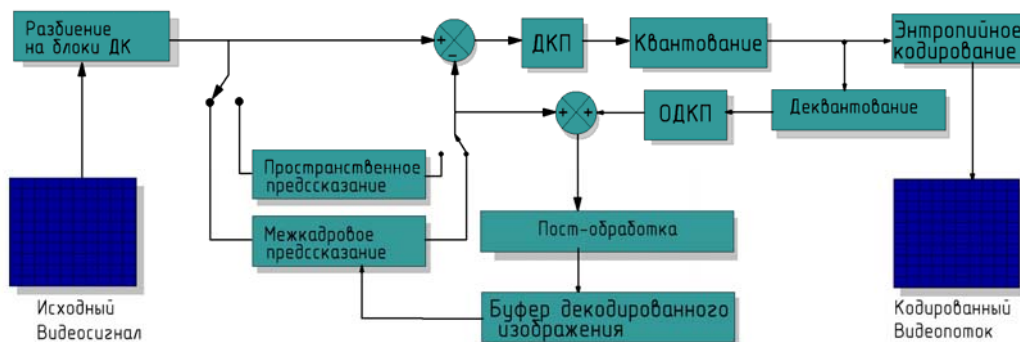


Рис.1.Базовая структура кодера H.265

Данная схема является упрощенной, но позволяет обобщенно рассмотреть принципы работы кодеков H.264-H.265, выявить их особенности по сравнению с младшими версиями кодеков (используемых для меньшего разрешения изображения, соответственно дающих меньшую степень сжатия и имеющих худшие показатели по быстродействию)..

Кодеры H.264-H.265 использует дискретно-косинусное преобразования (ДКП), которое представляет собой модификацию известного быстрого преобразования Фурье – разложение исходного сигнала в спектр с целью исключения из выходного сигнала «незначительных» спектральных составляющих, а также «огрубления» коэффициентов разложения [5]. Подобный прием используется и в младших версиях кодеков, например, в кодеках MPEG-4. Но, отличие кодеков для работы с изображениями высокой и сверхвысокой четкости – работа с целочисленными коэффициентами, что повышает производительность кодирующего устройства (в его роли может выступать специализированный процессор или центральный процессор ЭВМ).

Также в кодеках ТВЧ возможно применение не ДКП, а других видов преобразования, например, преобразования Уолша-Адамара. Делается это с целью повышения быстродействия кодека, хотя в ряде случаев ДКП дает лучшее качество изображения. После квантования сигнал (результат ДКП или другого спектрального преобразования) подвергается энтропийному кодированию. Под энтропийным кодированием понимают классические алгоритмы сжатия без потерь (и их модификации), основанные на построения дерева Хаффмана, т.е. на кодирование наиболее часто встречающихся элементов

более короткими символами алфавита, а более редко встречающихся элементов – более длинными символами алфавита. Алфавит создается для конкретного видеопотока свой [8].

Наиболее же весомый вклад во всех рассматриваемых кодеках вносит не кодирование статических изображений, а формирование опорных кадров с возможностью предсказания движения.

Как можно увидеть из рисунка в кодерах для этого применен известный в технике прием обратной связи с задержкой – рекурсии (в этом плане кодер напоминает цифровой рекурсивный фильтр). Предыдущий кадр с выхода кодера (после деквантования и обратного дискретного косинусного преобразования - ОДКП) попадает в вычитатель, на второй вход вычитателя подается следующий кадр, разбитый на блоки, либо результат предсказания (пространственного или межкадрового). Так формируются кадры трех типов – Опорный, предсказанный и двунаправленно предсказанный [2].

Более совершенным по сравнению с кодеком H.265 является кодек H.266, который также носит название VVC (Versatile Video Codec – универсальный видеокодек). Слово «универсальный» в названии данного кодека означает, что этот кодек поддерживает практически все существующие разрешения видеоданных: SD , HD , 4K , 8K, UHD, видео 360° и т.д. Кодек H.266 разработан на основе кодека H.265 но за счет ряда новых алгоритмических решений обеспечивает сокращение объема видеоданных (требуемой пропускной способности канала связи) в два раза при лучших (по сравнению с H.265) возможностях сжатия изображения [4]. Рассматриваемые кодеки имеют структуру, схожую с приведенной на рисунке, основные отличия в разнице реализации формата структур данных, внутреннего и внешнего предсказаний, способах преобразования, способах энтропийного кодирования и т.д.

Отличия основных алгоритмических решений и форматов представления данных для кодеков H.264 - H.266 представлены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ реализации кодеков H.264 - H.266

Элемент реализации	Реализация для H.264 (AVC)	Реализация для H.265 (HEVC)	Реализация для H.266 (VVC)
Формат структур данных	Макроблок 16x16 (с субблоками кратных размеров, например, 8x16, 16x8 и т.д)	Рекурсивная структура хранения данных, блоки предсказания 64x64, преобразования 32x32, цветность 32x32	Рекурсивная структура хранения данных, блоки предсказания 64x64, преобразования 32x32, цветность 32x32
Внутреннее предсказание	9 режимов прогнозирования для блоков 8x8 и 4x4 и 4 режима прогнозирования для блока 16x16	33 режима прогнозирования внутри угла и 65 режимов внутреннего прогнозирования	33 режима прогнозирования внутри угла и 65 режимов внутреннего прогнозирования
Межкадровое предсказание		Режимы прогнозирования: SKIP, DIRECT, MERGE (5 MV-кандидатов), AMVP (2 MV-кандидатов).	Режимы прогнозирования: SKIP, DIRECT, MERGE (5 MV-кандидатов), AMVP (2 MV-кандидатов).
Алфавиты		два алфавита по 16 справочных элементов	два алфавита по 16 справочных элементов
Преобразование	целое число ДКП 4X4 8X8; Преобразование Адамара	Технология RQT (на основе адаптивного преобразования дерева квадратов)	Технология RQT (на основе адаптивного преобразования дерева квадратов)
Энтропийное кодирование	целочисленное дискретное косинусное преобразование (ДКП), арифметическое кодирование CABAC	CABAC, CAVLC (кодирование переменной длины), Зигзагообразное сканирование ACS	CABAC, CAVLC (кодирование переменной длины), Зигзагообразное сканирование ACS



Далее исследуем характеристики производительности и степени сжатия кодеков H.264-H.265.

В [6] приведены данные о скорости передачи данных (битрейтах) для стандарта H.265 в зависимости от качества изображения (класса) для пяти тестовых изображений. На основе этих данных построена диаграмма сравнения битрейтов для стандарта H.265

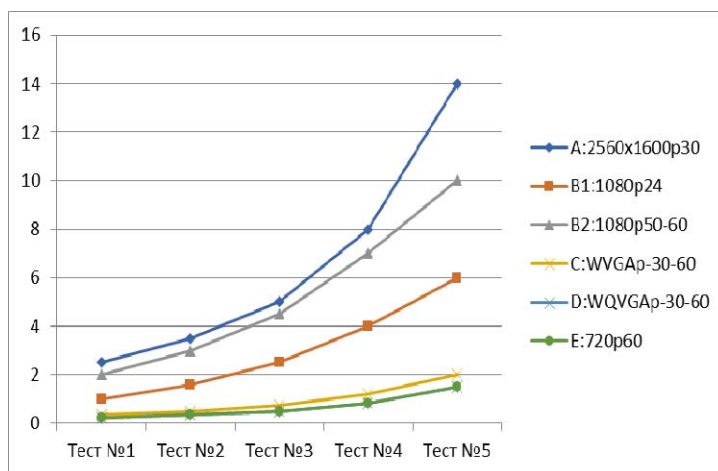


Рис. 2. Диаграмма сравнения битрейтов (Мбит/сек)

#### Актуальность модернизации нового кодека

При приемлемых показателях степени сжатия и достигаемого битрейта, совместимостью со всеми форматами, основным направлением дальнейшего совершенствования кодеков является дальнейшего повышение быстродействия кодеков (что особенно актуально для мобильных устройств, а также для видеосистем реального времени, например, систем видеонаблюдения). Ключом к повышению эффективности алгоритмов кодирования видеоданных является способ разбиения на подблоки блоков (двумерных массивов) видеоданных и способы работы с этими блоками.

В рассмотренных в п.1 алгоритмах H.264-H.266 предусмотрено несколько способов разбиения на блоки. Предложим эффективный критерий разбиения на блоки. Разбиения блоков кодирования на подблоки при кодировании выполняют с целью минимизации метрики RDC (от англ. RateDistortion Cost – соотношение скорость потока/искажение). Такой подход обеспечивает максимальную степень сжатия видеоизображения в каждом блоке при минимизации искажений, вносимых в изображение при кодировании. С другой стороны, при таком подходе реализуется перебор всех возможных комбинаций разбиений каждого блока, что приводит к крайне высоким вычислительным затратам. Для того, чтобы этого избежать, целесообразно останавливать процесс разбиения блоков предсказания на подблоки, если для текущего блока величина RDC не превышает порога  $T$ .

В ходе исследований была получена эмпирическая зависимость величины порога  $T$  от размера блока предсказания  $N$  и параметра квантования  $Q_p, Q_r$ .

Критерии вычисления порога приведены в таблице 2.

Таблица 2

Критерии определения порога соотношения скорость/искажения (RDC)

Размер блока $N$ (число элементов)	Величина порога $T$ (расчетная формула)
8	$1,054 \cdot e^{0,254Q_p}$
16	$19,75 \cdot e^{0,187Q_p}$
32	$164,6 \cdot e^{0,148Q_p}$
64	$962,7 \cdot e^{0,126Q_p}$

Предлагаемый нами модернизированный метод определения необходимости разбиения или прекращения разбиения блока кодирования на подблоки, основывается на комбинации двух различных критериев. Оба эти критерия позволяют принять решение на основании того, превышает определен-

ная мера некоторое пороговое значение или нет. Пороговые значения выбраны авторами обоих критериев эмпирическим методом.

Исследование модели нового кодека в системе MatLAB R2014 Simulink  
Модель разработанного кодека представлена на рисунке 3.

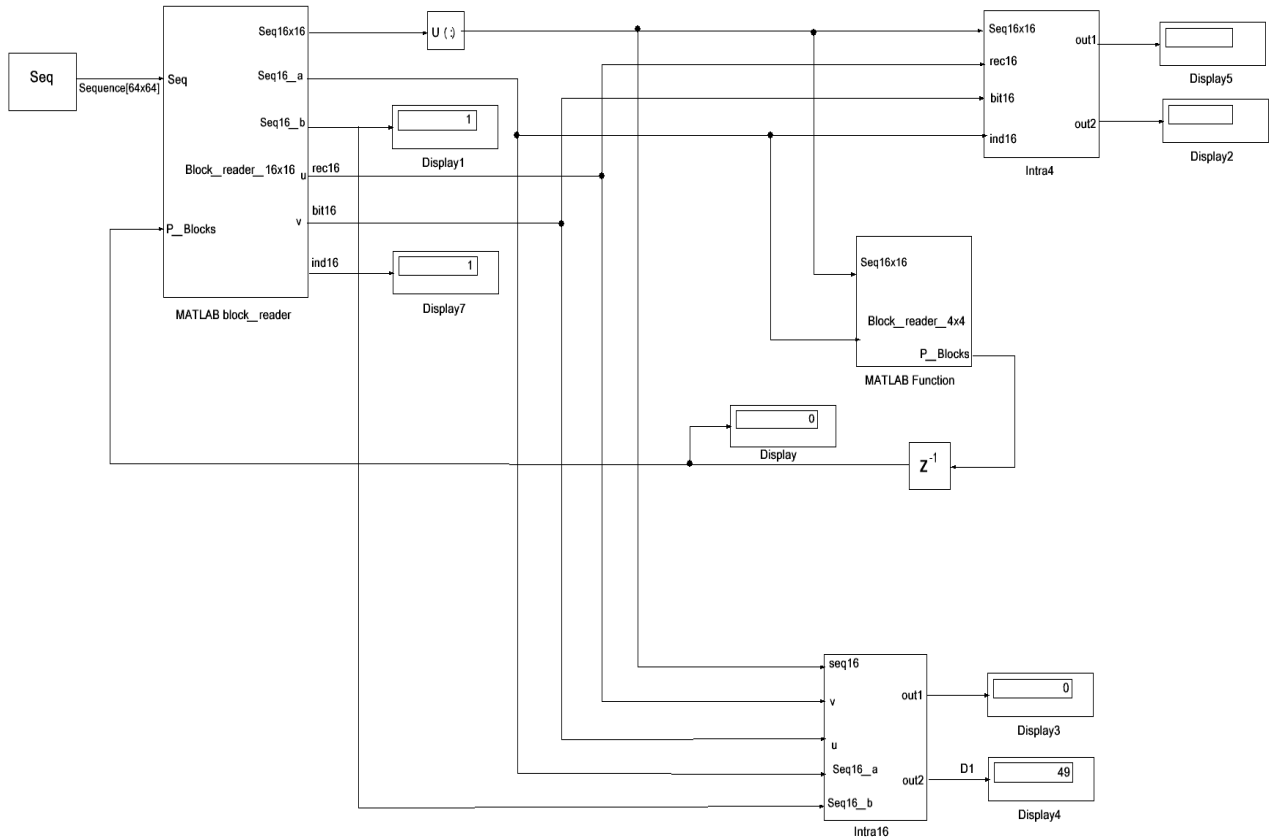


Рис. 3. Модель разработанного кодека

Рассмотрим влияние предлагаемых пороговых значений на количество правильно принимаемых решений о разбиении и не разбиении.

На рисунках 4 (а–г) представлены полученные в результате вычислений экспериментальные зависимости количества принимаемых решений от посчитанных значений сложности для блоков размером  $32 \times 32$  пикселя и коэффициента квантования равного 37.

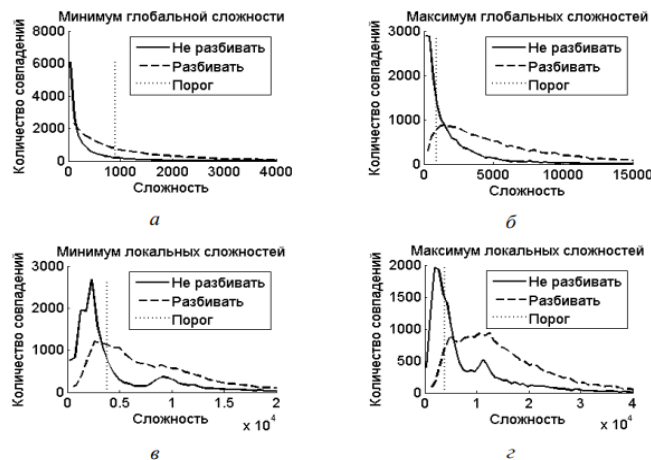


Рис. 4. Экспериментальная зависимость разбиения на блоки предсказания для адаптивного алгоритма разбиения

### Заключение

Современные алгоритмы сжатия видео данных, в том числе и исследованные в данной статье алгоритмы сжатия изображений высокой четкости H.264-H.265 имеют высокую степень сжатия, совместимость с различными форматами изображения (универсальность), распространены на многих устройствах и платформах. Рассмотренные же алгоритмы H.264-H.265 отличаются от младших версий более высоким качеством изображения при высокой степени сжатия и приемлемых аппаратных затратах, что позволяет использовать эти кодеки в таких решениях, как сети передачи данных с относительно низкой пропускной способностью, мобильные устройства, системы видеонаблюдения для хранения и обработки видеоданных высокой четкости.

В то же время, сравнительное исследование кодеков H.264-H.266 показало, что на некоторых режимах работы кодек не обеспечивает оптимального соотношения производительность/битрейт. Это предопределило необходимость разработки своего варианта кодека на основе существующих.

Основная идея, предложенная в данной статье – применение адаптивных пороговых критериев разделения на блоки предсказания. При достижении определенного порога процесс разделения останавливается, что приводит к существенной экономии аппаратных ресурсов.

### Литература

1. История развития форматов видеосжатия. Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/intel/blog/133198/> свободный (дата обращения: 27.01.2023). Conversion and coding practices for HDR/ WCG Y'CbCr 4:2:0 video with PQ transfer characteristics.
2. Sullivan G.J., Ohm J., Han W.J., Wiegand T. Overview of the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard // Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on. 2012. Vol. 2. No.12, pp. 1649-1668.
3. Максим Колинченко. Обзор стандарта H.265 HEVC. Режим доступа: <https://pdfslide.net/education/h265hevc.html> свободный (дата обращения: 27.01.2023).
4. Новый кодек H.266. Качество то же, объем файла вдвое меньше. Режим доступа: <https://dzen.ru/a/XwWT7RtdCBF8FTxN> свободный (дата обращения: 27.01.2023).
5. Jakub Stankowski et al., Multiview HEVC – experimental results. Documents of JCT-VC meeting, Geneva, 2011
6. Sullivan, G.J. Meeting report of the seventh meeting of the Joint Collaborative Team on Video Coding (JCT-VC), Geneva, CH, 21-30 Nov 2011.
7. Просто о видеокодировании. Режим доступа: <https://dzen.ru/a/XeYgzI1bXwCyUcOG> свободный (дата обращения: 27.01.2023).
8. Kim J., Choe Y., Kim Y. Fast Coding Unit Size Decision Algorithm for Intra Coding in HEVC // IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). January 2013, pp. 637-638.

## ПРЕДОБРАБОТКА ДАННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ МЕТОДОМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

**Гусева Олеся Александровна,**

*Московский Технический Университет Связи и Информатики, Москва, Россия*

[olesya\\_guseva\\_1999@mail.ru](mailto:olesya_guseva_1999@mail.ru)

**Раковский Дмитрий Игоревич,**

*Московский Технический Университет Связи и Информатики, ассистент кафедры ИБ, аспирант,  
Москва, Россия*

**Симонян Айрапет Генрикович,**

*Московский Технический Университет Связи и Информатики, доцент кафедры ИБ, к.т.н.,  
Москва, Россия*

### **Аннотация**

*На сегодняшний день вычислительные мощности компьютеров в некоторых ситуациях превосходят вычислительные возможности человеческого мозга, поэтому часть задач, связанных с обработкой больших данных, человек перекладывает на них. В работе рассмотрены основные проблемы, возникающие при использовании машинного обучения при обработке большого объема данных. Не обработанные, «исторические», данные чаще всего подвержены влиянию фундаментальных проблем, сопряженных с методикой их получения и табличным представлением. Представлен метод, позволяющий упростить задачу предварительной подготовки набора данных и выбора атрибутов и их количества.*

**Ключевые слова:** *анализ набора данных, машинное обучение, методы отбора данных, очистка набора данных.*

### **Введение**

При обработке больших массивов данных для решения задачи классификации человеку трудно задать набор правил, который может учесть все ситуации, чтобы качественно ее выполнить. Поэтому для этих целей следует использовать машинное обучение. Недостатком при таком подходе является зависимость качества результата от анализируемого набора данных. В тоже время человек может заметить ошибки в наборе данных и учесть их при задании набора правил, машина же ошибку может пропустить и в таком случае сделает неправильные выводы, которые в дальнейшем повлияют на качество решения задачи классификации данных. Если подать машине для обучения некачественный набор исходных данных, то не следует ожидать достоверного результата работы модели. Таким образом, перед человеком встаёт задача создания качественного набора обучающих данных. На сегодняшний день разработано много библиотек для различных языков программирования, реализующих большое разнообразие методов работы с данными. Следовательно, необходимо изучить уже существующие методы и отобрать те, которые будут наиболее эффективно решать задачу улучшения качества набора полученных для обучения.

### **1. Проблемы использования машинного обучения**

Набор данных можно представить как таблицу, каждая из колонок которой будет названа по имени одного из атрибутов, а каждая строка которой будет представлять собой данные очередного объекта, на котором обучается модель.

Фундаментальными проблемами [1, 14] являются дисбаланс классов [2], проклятие размерности [3], нелинейная корреляция атрибутов [4], многозначность меток классов [5].

Для выявления и оценки влияния вышеописанных проблем чаще всего прибегают к ряду статистических и информационных тестов, включающих в себя следующие операции:

1. Выявление некорректного формата данных: обнаружение пропущенных; дублирующих; некорректных значений в наборе данных. Пропущенные значения могут возникать в случаях, когда набор данных составлялся вручную, или, когда набор данных был составлен из нескольких таблиц

какой-либо базы данных, объединённых без учёта возможности наличия несвязанных строк в какой-то из таблиц. К некорректным данным относятся данные, тип которых не совпадает с предполагаемым типом данных для атрибута или величина которых является логически невозможной. Дубликаты возникают в случае обработки одного объекта дважды при составлении набора данных или, в случае составления набора данных из какой-то базы данных, состоящей из нескольких таблиц, при некорректном их объединении. Обнаружение невозможных комбинаций меток классов (проблема многозначности меток классов).

2. Выявление и устранение выбросов (нетипичные значения для набора данных; например, при наборе чисел для одного из параметров, лежащих в диапазоне от нуля до десяти, встречается значение тысяча);

3. Уменьшение количества параметров (при слишком большом количестве параметров модель будет обучаться нецелесообразно долго: время обучения зависит от возможностей применяемого оборудования и временными рамками, заданными разработчиком программного обеспечения в качестве допустимых);

4. Устранение незначимых параметров, никак не влияющих на результат, замедляющих обучение и вносящих ошибки.

5. Устранение значительной разницы в количестве экземпляров классов: уменьшение количества экземпляров преобладающего класса или дополнение экземплярами недостаточно полно описанного класса. Обнаружение подобной проблемы сигнализирует о дисбалансе классов.

6. Устранение ситуации наличия сильнокоррелированных параметров, нарушающих баланс в наборе данных. В случае наличия нелинейно сильнокоррелированных параметров присутствует проблема нелинейной корреляции параметров.

Описанные выше тесты выявляют данные, обладающие разной структурой; подверженные разному влиянию фундаментальных проблем. Следовательно, результаты анализа таких данных без предварительной обработки алгоритмами интеллектуального анализа данных будут непредсказуемыми; результаты такой обработки и выводы, формируемые аналитиком данных, невозможно обобщить.

## 2. Анализ данных

При обработке и анализе данных первоначально решаются задачи, связанные с проблемами наличия пропущенных значений, некорректных данных и выбросов, поскольку при их наличии нет возможности качественно их проанализировать [6].

Все эти три проблемы имеют одинаковые пути решения и заключаются в следующем:

- Удаление строки данных, содержащей проблемное значение.
- Изменение заданного проблемного значения на корректное. В случае работы с пропущенным значением – занесение его в набор данных.

Обнаружение выбросов может быть произведено визуально (например, при помощи построения графика парных отношений или частотной диаграммы), при помощи квартильного анализа или Z-оценки [7].

Квартильный анализ включает в себя деление всего ряда значений параметра на четыре равные по количеству значений части. Разница между значением первого и третьего квартиля называется межквартильным интервалом или межквартильным диапазоном. Z-оценка подходит для обнаружения выбросов в параметрах, имеющих нормальное распределение. Тогда для каждого значения вычисляется так называемый z-балл наблюдения. В зависимости от выбора коэффициента изменяется пороговый диапазон, все значения за пределами которого считаются выбросами.

После этого следует удалить дубликаты данных (повторяющиеся строки в наборе данных), которые не несут новой информации для модели, но могут негативно повлиять на вычисление весов во время обучения. После этого можно приступить к этапу анализа данных.

Для визуализации закономерностей в наборе данных используются частотная гистограмма, корреляционная диаграмма и график парных отношений.

Частотная гистограмма является графиком, наглядно отражающим распределение исследуемой величины вдоль всего диапазона принимаемых ей значений. Этот диапазон разбивается на отрезки равной величины, для которых подсчитывается количество вхождений значений в интервал. На основании этих данных строится столбчатая диаграмма, которая и называется частотной гистограммой.

Корреляционная диаграмма представляет собой графическое отображение числовых данных корреляции, в которых цвет отражает степень коррелированности между значениями, в т.ч. значения отрицательной корреляции.

График парных отношений показывает зависимости значений двух параметров друг от друга с визуальным выделением меток в точках: имеют ли параметры прямую зависимость друг от друга, позволяет ли комбинация параметров однозначно визуально разделить точки на два класса.

Первично следует построить частотную гистограмму для столбца меток и проверить, не существует ли в наборе данных дисбаланс классов. Если существует, следует сократить число примеров преобладающего класса. Возможные методы сокращения описаны в [8].

Далее следует обратить внимание на параметры, имеющие между собой высокий показатель корреляции. Корреляция – это взаимосвязь двух и более случайных величин, которое значит, что при изменении одной из двух сильнокоррелированных величин, другая будет изменяться практически прямопропорционально или обратнопропорционально [9]. Возможной проблемой может стать нелинейная корреляция аргументов.

После прохождения всех предыдущих этапов сформирован набор данных без выбросов, ошибок и повторяющихся строк, в котором параметры слабокоррелированы между собой. В концепции машинного обучения при принятии решения при определении класса объекта вычисляется его расстояние до ближайших точек, на основе чего делается предположение о принадлежности к классу. Для устранения избыточности количества признаков используют фильтры [10], обёрточные [11] и/или встроенные методы [12].

Предварительную обработку набора данных можно разделить на три основных этапа: очистка данных, анализ набора данных, сокращение размерности в соответствии с задачей (рис. 1).



Рис. 1. Этапы отбора данных

Первый этап – «очистка данных» – предназначен для первичной подготовки данных к последующему анализу.

Второй этап – анализ набора данных – предназначен для устранения недостатков набора данных, которые могут придать значимость каким-либо классам или параметрам при обучении и повлиять на процесс подбора весов, который отразится на качестве работы модели.

Третий этап – сокращение размерности – предназначен для выявления наиболее информативных признаков для обучения модели.

### 3. Применение представленного метода

Применение метода будет продемонстрировано на наборе данных, который называется Classification of Malwares (CLaMP) [13]. Это набор данных, созданный на основе значений полей заголовков переносимых исполняемых файлов, позволяющий классифицировать файлы как вредоносные или не вредоносные. Исходный размер набора данных – 5210 строк, 69 атрибутов. Для проведения отбора в рамках задачи используются библиотеки, разработанные для использования на языке программирования Python.

Для получения предварительного представления о состоянии набора данных была составлена тепловая диаграмма (рис. 2). На ней можно заметить белые полосы – так выглядят признаки с единственным уникальным значением. Признаков очень много, поэтому сделать какие-то выводы об их полезности достаточно сложно. По этой причине следует произвести обработку набора данных с помощью представленного метода.



Рис. 2. Исходная тепловая диаграмма

В соответствии с описанным выше методом первым этапом является очистка данных. На втором этапе выполняется анализ набора данных. Третьим этапом является сокращение размерности. Единственный шаг – сокращение количества признаков. После выполнения третьего этапа размер набора данных имел 4520 строк, 9 атрибутов (включая результирующий с метками классов). Полученный итоговый набор атрибутов включает в себя:

- SizeOfCode,
- SizeOfInitializedData,
- SizeOfUninitializedData,
- CheckSum,
- SizeOfStackReserve,
- SizeOfStackCommit,
- SizeOfHeapReserve,
- SizeOfHeapCommit,
- class.

Полученная тепловая диаграмма представлена на рис. 3. Все атрибуты между собой слабокоррелированы, при этом существует корреляция с атрибутом меток классов. График парных отношений приведён на рисунке 4. Можно заметить, что визуально возможно произвести чёткое разделение точек, принадлежащих разным классам. Стоит отметить, что сложнее провести визуальное разделение на классы у признаков с высокой взаимной корреляцией.

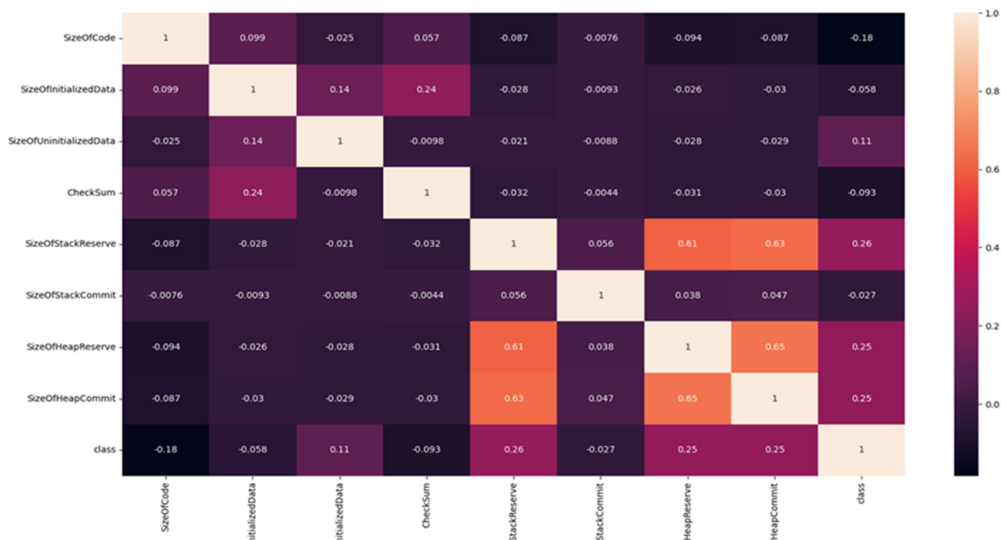


Рис. 3. Корреляционная диаграмма

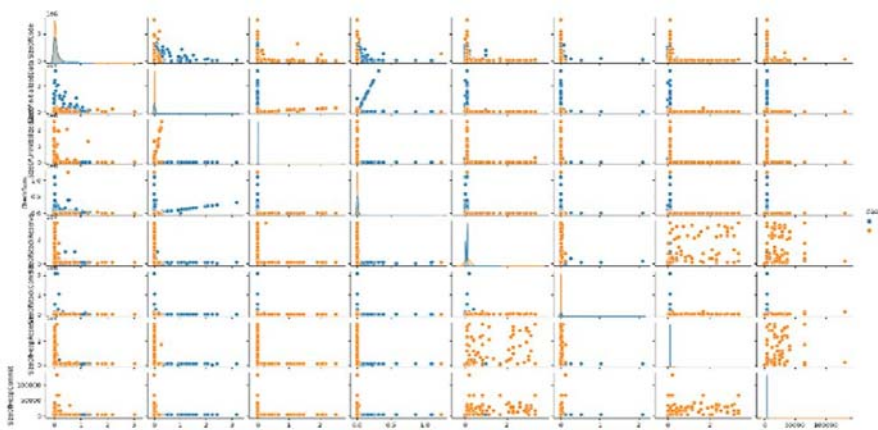


Рис. 4. График парных отношений

### Заключение

В результате проведенных исследований разработан метод предобработки данных для решения задач классификации, включающий в себя три этапа, разбитых на один или несколько более детальных шагов.

Благодаря разработанному методу упрощается задача предварительной подготовки набора данных и выбора атрибутов и их количества. Практическая значимость работы заключается в повышении качества выполнения будущей задачи и оптимизации затрачиваемого времени на подготовку уже собранных данных за счёт прописанного алгоритма предобработки данных.

Дальнейшим направлением исследования является автоматизация некоторых этапов разработанной метода в виде отдельной библиотеки, позволяющей снизить временные затраты на реализацию предобработки в соответствии с рассмотренным методом.

### Литература

1. Шелухин О.И., Раковский Д.И. Выбор метрических атрибутов редких аномальных событий компьютерной системы методами интеллектуального анализа данных // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 6. С. 40-47. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-6-40-47. EDN YJDUYV
2. Менищikov А.А., Федосенко М.Ю. Методы и подходы к предобработке данных платежей при условии сильной несбалансированности классов // StudNet. 2021. №9. DOI 10.24411/2658-4964-2021-103682
3. The Curse of Dimensionality! // Medium URL: <https://medium.com/diogo-menezes-borges/give-me-the-antidote-for-the-curse-of-dimensionality-b14bce4bf4d2> (дата обращения: 01.10.2022).
4. Баврина А.П., Борисов И.Б. Современные правила применения корреляционного анализа // Медицинский альманах. 2021. №3 (68). С. 70-79.
5. Bogatinovski J., Todorovski L., Džeroski S., Kocev D. Comprehensive Comparative Study of Multi-Label Classification Methods. Vol. 203. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117215>
6. Моем датасет: руководство по очистке данных в Python // proglib URL: <https://proglib.io/p/moem-dataset-rukovodstvo-po-ochistke-dannyh-v-python-2020-03-27> (дата обращения: 01.10.2022).
7. Outlier Detection and Handling // baeldung URL: <https://www.baeldung.com/cs/ml-outlier-detection-handling> (дата обращения: 01.10.2022).
8. Сэмплинг в условиях несбалансированности классов // loginom URL: <https://loginom.ru/blog/imbalance-class> (дата обращения: 01.10.2022).
9. Самойленко Н.И., Кузнецов А.И., Костенко А.Б. Теория вероятностей: Учебник. Х.: Издательство «НТМТ», ХНАГХ. 2009. 200 с.
10. Построение и отбор признаков. Часть 2: feature selection // proglib URL: <https://proglib.io/p/postroenie-i-otbor-priznakov-chast-2-feature-selection-2021-09-25> (дата обращения: 01.10.2022).
11. Методы обертки (wrappers) // Студопедия URL: [https://studopedia.ru/29\\_26052\\_metodi-obertki-wrappers.html](https://studopedia.ru/29_26052_metodi-obertki-wrappers.html) (дата обращения: 01.10.2022).
12. Уменьшение размерности // ИТМО URL: [https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Уменьшение\\_размерности](https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Уменьшение_размерности) (дата обращения: 01.10.2022).
13. Classification of Malwares (CLaMP) // Kaggle URL: <https://www.kaggle.com/datasets/saurabhshahane/classification-of-malwares> (дата обращения: 01.10.2022).
14. Шелухин О.И., Раковский Д.И. Бинарная классификация многоатрибутных размеченных аномальных событий компьютерных систем с помощью алгоритма SVDD // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 2. С. 74-84.



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАДИОКОНТРОЛЯ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ СОТОВОЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ МАСОК

**Осипов Гурген Леонович,**

*Московский Технический Университет Связи и Информатики, Москва, Россия,*  
[g.l.osipov@mail.ru](mailto:g.l.osipov@mail.ru)

**Панкратов Денис Юрьевич,**

*Московский Технический Университет Связи и Информатики, доцент, к.т.н., Москва, Россия,*  
[dpankr@mail.ru](mailto:dpankr@mail.ru)

### **Аннотация**

*Анализируются особенности ведения радиоконтроля в диапазонах частот сотовой связи, обобщаются требования к системам радиоконтроля в условиях усложнения радиоэлектронной обстановки, формулируется задача повышения эффективности радиоконтроля при использовании спектральных масок. Предлагается имитационная модель, обеспечивающая исследование известных и разрабатываемых новых решений по оценке соответствия радиоизлучений предъявляемым требованиям.*

**Ключевые слова:** Радиоконтроль, диапазоны частот сотовой связи, спектральные маски, уровень внеполосных излучений, моделирование.

### **Введение**

Усложнение радиоэлектронной, электромагнитной и помеховой обстановки в диапазонах частот сотовой связи ставит новые задачи перед системой радиоконтроля, которые требуют адекватных научных, организационных, технических и программных решений. Принятая Решением Государственной комиссии по радиочастотам при Минкомсвязи РФ от 4 июля 2017 года Концепция развития системы контроля за излучениями радиоэлектронных средств и высокочастотных устройств гражданского назначения в России на период до 2025 г. безусловно стала важным шагом в развитии радиоконтроля [1]. Реализация положений концепции осуществляется в условиях стремительного совершенствования систем сотовой связи и иных систем, работающих в одном диапазоне частот. Использование принципа технологической нейтральности, предоставляющего сотовым компаниям свободу в совершенствовании технологий и взаимной конкуренции, требует концентрации на наиболее приоритетных задачах радиоконтроля. В этих условиях повышаются требования к эффективности процессов оценки соответствия радиоизлучений регламентированным спектральным маскам. В связи с этим предлагается имитационная модель процессов радиоконтроля на основе спектральных масок, обеспечивающая исследование известных и разрабатываемых новых решений по оценке соответствия радиоизлучений предъявляемым требованиям.

### **Особенности ведения радиоконтроля в диапазонах частот сотовой связи**

Основными объектами радиоконтроля в диапазонах частот сотовой связи на текущем этапе являются: сети беспроводного широкополосного доступа, сети мобильной связи предыдущих поколений (GSM (2G) UMTS (3G), LTE (4G)), в ближайшее время: сети пятого – 5G и шестого поколений – 6G [10-21] и т.д.), сети цифрового наземного и спутникового теле- и радиовещания, системы спутниковой навигации [2].

Для объектов радиоконтроля в диапазонах частот сотовой связи характерны следующие особенности:

- 1) массовое внедрение сотовой связи и увеличение количества средств радиосвязи;
- 2) переход в более высокие частотные диапазоны;
- 3) увеличение используемой ширины полосы частот излучаемых сигналов до десятков МГц (например, уже в сетях 5G при агрегации несущих полоса может увеличиться по отношению к сетям 4G в несколько раз и достигнуть 100 МГц);
- 4) использование новых видов модуляции;

- 5) расширение использования методов кодового разделения цифровых каналов;
- 6) увеличение количества антенн ММО (multiple input multiple output) и применений антенных решеток [3], [8], [Ошибка! Источник ссылки не найден.];
- 7) массовая доступность устройств преднамеренного создания помех и другие.

Перечисленные особенности имеют следствием усложнение радиоэлектронной, электромагнитной и помеховой обстановки, что приводит к усложнению процессов радиоконтроля.

Кроме того, наблюдается усиление угроз антропогенного характера.

В первую очередь этому способствует развитие технологий и расширение многообразия устройств как собственно в сотовой связи, так и в сфере противодействия ей и получения несанкционированного доступа к информации. Результатом является усиление угроз, вызванных неумышленными действиями ввиду непрофессионализма персонала и, тем более, преднамеренными действиями профессионалов.

Также негативное влияние оказывает практически свободная продажа специализированных устройств, что дает широкие возможности влиять на работу сотовых сетей.

Электромагнитная обстановка усложняется не только в связи с развитием сотовой связи, но и интенсивным параллельным развитием спутниковых систем навигации, связи и др.

Помеховая обстановка также эволюционирует в сторону усложнения.

Перечисленные особенности и факторы существенно усложняют радиоконтроль в диапазонах сотовой связи и предъявляют новые и повышенные требования к организации, технологиям, программным и техническим средствам радиоконтроля.

Современное состояние системы радиоконтроля в диапазонах частот сотовой связи характеризуется следующими существенными моментами [2, 4]:

- 1) интенсивное увеличение количества технических средств;
- 2) расширение спектра программных решений;
- 3) комплексирование технических средств и программных комплексов;
- 4) автоматизированное планирование применения распределенных устройств радиоконтроля;
- 5) удаленное сетевое управление отдельными устройствами радиоконтроля в автоматизированном и автоматическом режимах;
- 6) применение стационарных, возимых и носимых средств и комплексов радиоконтроля вплоть до использования беспилотных летательных аппаратов.

В Российской Федерации, как и других странах, прежде всего европейских, реализуется концепция технологической нейтральности. Первым практическим шагом в России стало решение Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ) от 2013 в рамках выдачи частот для технологий Long-Term Evolution (LTE) и Wideband Code Division multiple Access (WCDMA).

Основным положительным результатом от использования принципа технологической нейтральности является ускорение внедрения новых инновационных технологий в выделенных полосах частот и создание условий для развития конкуренции операторов сотовой связи, что является главным фактором общего совершенствования для всех систем сотовой связи.

При реализации принципа технологической нейтральности потенциально возможно использование шести методов:

1. Определение для полосы радиочастот перечня возможных технологий (стандартов) и условий их использования.
2. Маски излучений передатчика.
3. Маски плотности потока мощности.
4. Маски спектральной плотности передатчиков.
5. Смешанный метод.
6. Метод определения пространственно-частотной области.

На практике нашли применение только два метода: на основе перечня технологий и на основе масок излучения передатчика – ВЕМ (block edge mask).

Маски создаются для регулирования помех в соседних частотных каналах и диапазонах. Опыт использования масок ВЕМ показал, что методы измерения масок и соответственно контроль их выполнения операторами является достаточно сложной задачей.

В условиях интенсивного развития систем сотовой связи и других радиоэлектронных систем, работающих в диапазоне частот сотовой связи, и коррелированного с ним совершенствования радиоконтроля, существует потребность в постоянной адаптации используемых методов обработки спектральной информации, а также поиска и применения новых решений.

Безусловно, что при реализации принципа технологической нейтральности для систем радиоконтроля наиболее актуальной задачей является контроль соответствия спектров реальных излучений в диапазонах частот сотовой связи заданным спектральным маскам.

Задача не имеет тривиального решения, модифицируется и усложняется с развитием радиоэлектронных систем, работающих в диапазоне частот сотовой связи, и коррелированного с ними совершенствования систем радиоконтроля.

В связи с этим необходимым и целесообразным является проведение исследований на основе моделирования процессов радиоконтроля используемых и перспективных сигналов, направленное на оценку качества принимаемых решений при использовании известных и разработке новых алгоритмов обработки спектральных масок с целью повышения эффективности радиоконтроля.

### **Подход к моделированию процессов радиоконтроля на основе спектральных масок**

С учетом анализа особенностей ведения радиоконтроля в диапазонах частот сотовой связи практически в качестве аксиом можно рассматривать следующие условия:

- 1) системы сотовой связи будут интенсивно развиваться в количественных (количество операторов, базовых станций, абонентов) и качественных показателях (технологии);
- 2) система радиоконтроля должна развиваться коррелировано с развитием систем сотовой связи;
- 3) основными требованиями со стороны системы радиоконтроля к операторам сотовой связи в рамках реализации принципа технологической нейтральности на длительный период останутся требования к уровням внеполосных излучений (спектральные маски), в настоящее время определены нормами 19-21 [5];
- 4) основной задачей системы радиоконтроля на длительный период будет контроль соблюдения требований к уровням внеполосных излучений.

В зависимости от степени учета особенностей модуляции и других факторов, влияющих на спектр радиосигнала, задача оценки соответствия излучений требованиям по внеполосным излучениям может стать трудно решаемой как в плане сложности, так и невозможности оперативной обработки сигналов. Перед системой встанет вопрос выбора между производительностью и точностью.

В этих условиях особое значение приобретают экспресс-методы, реализующие следующую последовательность операций:

- 1) регистрация спектра радиоизлучения;
- 2) определение ширины спектра и класса, к которому принадлежит радиоизлучение;
- 3) сопоставление спектра радиоизлучения с регламентированной для него маской;
- 4) принятие решения о нарушении требований к внеполосным радиоизлучениям;
- 5) передача информации о факте угрозы (нарушения требований), а также зарегистрированного спектра, на идентификацию и более глубокое исследование.

Сопоставление известных алгоритмических решений обработки спектральных масок требует их проверки на одинаковых наборах спектральных масок. Синтез новых решений и их оценка невозможны без наличия выборок спектральных масок и результатов их использования при радиоконтроле. Актуальной также является проблема поиска и использования новых информативных признаков в спектральных масках.

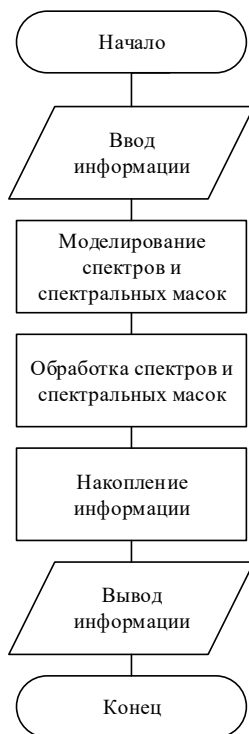
Логичным решением в этих условиях является разработка имитационных моделей и исследование на их основе процессов обработки спектральных масок с целью выявления информативных признаков, оценки известных и разрабатываемых алгоритмов работы со спектральными масками.

Разработан обобщенный алгоритм моделирования процессов радиоконтроля с использованием спектральных масок, который представлен на рис.1.

Прокомментируем особенности процесса моделирования, определяющие его отличия.

Ввод информации подразумевает не только ввод параметров, задающих режим моделирования и генерации спектральных масок, но и ввод зарегистрированных спектров. Прорабатывается вопрос ввода реальных сигналов.

Моделирование спектров и спектральных масок включает операции формирования заданных (образцовых) масок, спектральных масок радиоизлучений с заданными параметрами, масок на основе зарегистрированных спектров.



**Рис. 1.** Обобщенный алгоритм моделирования процессов радиоконтроля на основе спектральных масок

Образцовые маски формируются в соответствии с нормами 19-21 [5].

Для радиоэлектронных средств сетей связи стандарта LTE и внеполосных излучений при полосе частотного канала 5, 10, 15 и 20 МГц для диапазона рабочих частот ниже 1 ГГц используются следующие требования.

Максимально допустимый уровень внеполосных излучений для значений расстройки между крайней частотой канала и номинальной точкой на уровне минус 3 дБ центра огибающей измерительного фильтра, обращенной к несущей частоте, устанавливается для трех интервалов расстройки: от 0,05-МГц до 5,05 МГц, от 5,05 МГц до 10,05 МГц, от 10,05 МГц и далее.

Ширина полосы измерительного фильтра в первом и втором интервалах 100 кГц, в третьем интервале – 1 МГц.

Максимально допустимые уровни внеполосных излучений в первом из интервалов убывают линейно с -7 дБм до -14 дБм, во втором и третьем интервалах – фиксированные, -15 и -13 дБм, соответственно.

Обработка спектров и спектральных масок характеризуется следующими особенностями. Первоначально реализуются операции, основанные на совместной обработке формируемых спектральных масок исследуемых радиоизлучений и заданных спектральных масок. Обработка спектральных масок включает сопоставление входных масок с заданной маской с использованием одного из алгоритмов (известного или исследуемого нового) с целью формирования информативных признаков для повышения эффективности радиоконтроля.

В дальнейшем при работе со спектрами реальных сигналов для оценки соответствия реального спектра заданному планируется применить способы, основанные на использовании линейного коэффициента корреляции (Spectral Correlation Coefficient (SCC)), угловой меры подобия (SAM – Spectral Angle Mapper) и меры информационного расхождения (SID – Spectral Information Divergence). Как известно, названные способы могут быть использованы отдельно или положены в основу более сложных, что создает дополнительные возможности по моделированию с целью выявления решений, позволяющих повысить эффективность радиоконтроля.

Следует обратить внимание на важность накопления информации об использовании известных и новых предлагаемых решений. Наличие систематизированной информации является основой для разработки и исследования новых решений и сопоставления их с ранее апробированными в идентичных условиях.

Вывод информации подразумевает создание интерфейса, позволяющего визуализировать результаты моделирования

В реализационном плане выполнена разработка программ, наиболее важных для начала практических исследований. Технологии моделирования обрабатываются в среде MatLab. Рассматриваются варианты использования других программных сред, способных обеспечить реализацию более дружественных интерфейсов.

В качестве наиболее перспективного направления исследований определено формирование в ходе моделирования данных для обучения нейронных сетей.

### Заключение

В ближайшей перспективе, в связи с мерами повышения эффективности использования спектра в системах G5 и G6 [6, 7], сформируются новые задачи для систем радиоконтроля в диапазонах частот сотовой связи.

Системы радиоконтроля, помимо увеличения количества радиоэлектронных средств, встретятся с применением усовершенствованных форм сигналов, модуляции, кодирования и многостанционного доступа. Существенно изменятся антенные технологии, в частности, наряду с совершенствованием систем ММО вплоть до формирования трехмерных лучей (FD-MIMO (3D beamforming)), активные антенные системы с решетками излучателей. Гибкость использования спектра вырастет за счет агрегации несущих и других методов.

Одним из основных отличий сетей 6G от 5G для абонентов является ориентированность на увеличение многообразия услуг, которыми они смогут воспользоваться.

Прогнозируемые тенденции развития приведут к дополнительному усложнению радиоэлектронной обстановки, что поставит перед системами радиоконтроля новые теоретические и практические проблемы.

В обозримом будущем важнейшей программно-технической задачей при радиоконтроле будет оценка соответствия реальных спектров радиоизлучений заданным спектральным маскам.

В связи с этим предложена имитационная модель процессов радиоконтроля в диапазонах частот сотовой связи на основе спектральных масок, позволяющая решать задачи по повышению эффективности радиоконтроля. Реализация функциональных возможностей модели в полном запланированном объеме может сделать ее востребованным инструментом решения научных и практических задач.

### Литература

1. Концепция развития системы контроля за излучениями радиоэлектронных средств и (или) высокочастотных устройств гражданского назначения в Российской Федерации на период до 2025 года. Утверждена решением ГКРЧ от 4 июля 2017 г.
2. Кизима С.В. Объекты и средства радиоконтроля. Совместное развитие технологий радиосвязи и радиоконтроля. М.: Электросвязь. 2018. № 11. С. 68-74.
3. Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б. Технология ММО: принципы и алгоритмы. М.: Горячая линия – Телеком, 2014.
4. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Автоматизированные системы радиоконтроля и их компоненты. М.: Горячая линия, 2017.
5. Нормы 19-21 «Нормы на ширину полосы радиочастот и внеполосные излучения радиопередатчиков гражданского применения». Приложение № 3 к решению Государственной комиссии по радиочастотам от 29.11.2021 № 21-60-01. – М., 2021.
6. Концепция создания и развития сетей 5G/IMT-2020 в Российской Федерации (Проект) [Электронный ресурс]// Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. URL: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/proekt-kontseptsii-sozdaniya-i-razvitiya-setej-5g-imt-2020-v-rossijskoj-federatsii.pdf> (дата обращения 21.01.2023).
7. Сети мобильной связи 6G. План действий для России. [Электронный ресурс]// Научно-технический журнал «Электросвязь». URL: <https://www.elsv.ru/seti-mobilnoj-svyazi-6g-plan-dejstvij-dlya-rossii/> (дата обращения 21.01.2023).

8. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю. Технологии в системах радиосвязи на пути к 5G. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 280 с.
9. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю. Анализ пропускной способности канала MIMO в условиях замираний // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. Т. 9. № 2. С. 13-20.
10. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б. Проблема повышения спектральной эффективности и емкости в перспективных системах связи 6G // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 2. С. 25-31.
11. Крейнделин В.Б., Резнёв А.А. Матрица пространственно-временного кода высокой размерности типа "Голден" // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12. № 6. С. 34-40.
12. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю. Алгоритмы нелинейной фильтрации двоичной ЛРП со случайной задержкой и случайной начальной фазой // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2019. Т. 10. № 2. С. 45-51.
13. Крейнделин В.Б., Григорьева Е.Д. Анализ быстрого алгоритма умножения матриц и векторов для банка цифровых фильтров // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 1. С. 4-10.
14. Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Смирнов А.Э. Способы минимизации объёма передаваемой информации в обратном канале многоантенных систем MIMO // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 3. С. 17-24.
15. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю. Применение технологии MIMO в современных системах беспроводной связи разных поколений // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 4. С. 4-12.
16. Крейнделин В.Б., Григорьева Е.Д. Реализация банка цифровых фильтров с пониженной вычислительной сложностью // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. № 7. С. 48-53.
17. Панкратов Д.Ю., Степанова А.Г. Компьютерное моделирование технологии MIMO для систем радиосвязи // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12. № 12. С. 33-37.
18. Панкратов Д.Ю., Сердюков А.А. Моделирование системы MIMO в режиме Beamforming. DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2021. Т. 11. № 2. С. 12-21.
19. Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю., Смирнов А.Э. Технология NOMA с кодовым разделением в 3GPP: 5G или 6G? // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 1. С. 4-10.
20. Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Миронов Ю.Б., Панкратов Д.Ю., Смирнов А.Э. Схемы модуляции для систем сотовой связи 5G/IMT-2020 и 6G // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 3. С. 11-17.
21. Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю., Смирнов А.Э. Схемы NOMA с обработкой на уровне символов // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 5. С. 4-14.

## ФОРМИРОВАНИЕ БИПОЛЯРНЫХ СИГНАЛОВ, НЕ ВЫЗЫВАЮЩИХ ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ В ЛИНЕЙНОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ

**Санников Владимир Григорьевич,**

*Московский Технический Университет Связи и Информатики, доцент, к.т.н., Москва, Россия*  
[vlsangr0491@gmail.com](mailto:vlsangr0491@gmail.com)

**Волчков Валерий Павлович,**

*Московский Технический Университет Связи и Информатики, профессор, д.т.н., Москва, Россия*

### Аннотация

Рассматривается задача повышения скорости передачи данных в линейных каналах связи. Исследуются вопросы формирования биполярных сигналов в виде двоичных видеоимпульсов с регулируемыми моментами времени перехода через ноль на их длительности и не вызывающих последствий в линейном канале связи. Приводятся необходимые условия для расчета указанных временных моментов для различных моделей линейных каналов связи.

**Ключевые слова:** Система передачи данных, линейный канал связи, переходные процессы, биполярные сигналы без последствий, регулируемые моменты времени, скорость передачи данных.

### Введение

Повышение помехоустойчивости и информационной эффективности систем передачи данных (СПД) - основные задачи, стоящие перед современной радиоэлектроникой. Этим задачам в литературе уделено очень большое внимание. В частности, в работах [1-6] основное внимание уделяется передаче данных по идеальным каналам связи (каналы без памяти, без последствий) при наличии в канале только аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ). В реальных каналах связи с памятью наряду с АБГШ на помехоустойчивость передачи данных существенное влияние оказывают переходные процессы. Вопросам передачи данных в каналах с памятью или с последствием посвящены работы [7-9]. В этих работах показано, что при увеличении скорости передачи данных основную роль в снижении помехоустойчивости СПД играют переходные процессы, вызывающие явление межсимвольной интерференции (МСИ) при последовательной передаче данных по реальному каналу связи. Вопросам нивелирования или устранения МСИ посвящен ряд работ [10-14], в которых решаются задачи по синтезу такой формы сигналов на передаче (системы с адаптивным корректированием передаваемых сигналов), которые согласованы с характеристиками линейного канала связи и принципиально не вызывают МСИ на его выходе. В работах [15-17] основное внимание компенсации МСИ уделяется не на передающем, но на приемном конце системы связи. Вопросам синтеза оптимальных финитных сигналов без МСИ посвящены работы [18-21]. Наряду с определенными достоинствами этих сигналов, выявлен основной их недостаток – высокое значение пик-фактора.

В связи со сказанным, встает актуальная задача формирования новых сигналов, не вызывающих последствий на выходе линейного канала связи с памятью, с повышенной скоростью передачи и пик-фактором, сравнимым с пик-фактором классических сигналов прямоугольной формы. Этому вопросу и посвящена настоящая работа.

### Модели линейного канала связи

Стационарный линейный канал связи (ЛКС) полностью определяется передаточной функцией  $k(p)$  и импульсной реакцией  $q(t)$  [22].

В случае, когда  $k(p)$  дробно-рациональная функция

$$k(p) = \frac{b(p)}{a(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0}, m < n, \quad (1)$$

а полюсы передаточной функции  $k(p)$  простые  $\alpha_i, i = \overline{1, n}$ , определяемые как нули полинома  $a(p) = \prod_{i=1}^n (p - \alpha_i)$ , соотношение (1) сводится к виду

$$k(p) = \frac{c_1}{(p - \alpha_1)} + \frac{c_2}{(p - \alpha_2)} + \dots + \frac{c_n}{(p - \alpha_n)}, \quad (2)$$

где  $c_i, i = \overline{1, n}$  - постоянные, называемые *вычетами*, определяются по соотношению

$$c_i = [(p - \alpha_i)k(p)] \Big|_{p=\alpha_i} \quad (3)$$

Применяя к (2) обратное преобразование Лапласа, находим импульсную реакцию ЛКС с простыми полюсами

$$q_1(t) = \sum_{i=1}^n c_i e^{-\alpha_i t}, t \geq 0. \quad (4)$$

Для случая, когда  $k(p)$  имеет кратные полюса  $a(p) = \prod_i (p - \alpha_i)^{m_i}$  с кратностью  $m_i \geq 1$ , импульсная реакция ЛКС определяется так

$$q_2(t) = \sum_i c_i(t) e^{-\alpha_i t} = \sum_i \sum_{r=0}^{m_i-1} c_{ir} t^r e^{-\alpha_i t} = \sum_i c_i[\alpha_i, r] e^{-\alpha_i t}, \quad (5)$$

где  $c_i[\alpha_i, r] = \sum_{r=0}^{m_i-1} c_{ir} (-1)^r \frac{d^r}{d\alpha_i^r}$  - линейный дифференциальный оператор, а вычеты  $\{c_{ir}\}$  равны

$$c_{ir} = \frac{1}{(r-1)!} \cdot \frac{\partial^{r-1}}{\partial p^{r-1}} [(p - \alpha_i)^{m_i} k(p)] \Big|_{p=\alpha_i}. \quad (6)$$

В работе [23] отмечается, что в различных телекоммуникационных приложениях часто применяется модель ЛКС с комплексными и комплексно-сопряженными величинами

$$\dot{c}_i = c_i \pm j d_i, \quad \dot{\alpha}_i = \alpha_i \pm j \beta_i, \quad i = \overline{1, n/2}.$$

В этом случае импульсная реакция ЛКС определяется следующими соотношениями

$$q_3(t) = \sum_{i=1}^{n/2} e^{-\alpha_i t} (c_i \cos \beta_i t + d_i \sin \beta_i t) = \operatorname{Re} \sum_{i=1}^{n/2} \dot{c}_i e^{-\dot{\alpha}_i t}. \quad (7)$$

Обобщением модели ЛКС с комплексными полюсами является следующая модель ЛКС с комплексными и кратными полюсами. Импульсная реакция такого ЛКС определяется следующими соотношениями

$$\begin{aligned} q_4(t) &= \sum_i e^{-\alpha_i t} [c_i(t) \cos \beta_i t + d_i(t) \sin \beta_i t] = \\ &= \sum_i \sum_{r=0}^{m_i-1} e^{-\alpha_i t} t^r [c_{ir} \cos \beta_i t + d_{ir} \sin \beta_i t] = \\ &= \operatorname{Re} \sum_i \dot{c}_i[\alpha_i, r] e^{-\dot{\alpha}_i t}, t \geq 0, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\dot{c}_i[\alpha_i, r] = \sum_{r=0}^{m_i-1} (-1)^r (c_{ir} + j d_{ir}) \frac{d^r}{d\alpha_i^r}$  - комплексный линейный дифференциальный оператор.



### Постановка задачи формирования биполярных сигналов без последействия в ЛКС

В широкополосных СПД каждый двоичный символ с длительностью  $T$ , преобразуется в многоимпульсный биполярный сигнал той же длительности [6]. Финитный многоимпульсный сигнал (ФМС) представляет собой последовательность прямоугольных разно полярных импульсов единичной амплитуды, заданных на интервале  $0 \leq t \leq T$ . В случае если ЛКС является высокочастотным, то видеоимпульсы ФМС следует заменить на радиоимпульсы с использованием того или иного вида дискретной модуляции.

В данной работе, без потери общности решаемых задач, рассматривается низкочастотный эквивалент высокочастотного ЛКС.

В отличие от применяемых систем с ФМС, имеющих на  $T$  одинаковую длительность  $\tau_n = T/N$ , где  $N$  – число импульсов в пачке, рассмотрим системы сигналов, имеющих на  $T$  разную длительность. Тогда, при заданных характеристиках ЛКС, математическая задача формирования ФМС, не вызывающих переходного процесса в ЛКС после момента  $t \geq T$ , сводится к определению моментов времени  $t_k, k = 1, 2, \dots, n$  – моментов смены полярностей элементарных импульсов ФМС на интервале  $T$  при условии, что отклик канала  $y(t)$  на ФМС  $x(t)$  будет финитным:  $y(t), 0 \leq t \leq T$ .

Рассмотрим подробнее этот вопрос.

В общем случае биполярный ФМС  $x(t), 0 \leq t \leq T$ , который необходимо передать по ЛКС, принимает вид

$$x(t) = \sigma(t) + 2 \sum_{k=1}^n (-1)^k \sigma(t - t_k) + (-1)^{n-1} \sigma(t - T), \quad (9)$$

где  $\sigma(t)$  – функция единичного скачка (функция Хевисайда),  $n$  – порядок передаточной функции ЛКС.

Математически задача формирования ФМС сводится к определению моментов времени  $t_k, k = 1, 2, \dots, n$ , моментов смены полярности составных прямоугольных импульсов сигнала  $x(t)$  на длительности  $T$ , удовлетворяющих условию, что отклик ЛКС  $y(t)$  на этот сигнал будет также финитным, т.е. задан функцией  $y(t), 0 \leq t \leq T$ .

Отклик ЛКС на сигнал  $x(t), 0 \leq t \leq T$ , можно записать следующим образом

$$y(t) = h(t) + 2 \sum_{k=1}^n (-1)^k h(t - t_k) + (-1)^{n-1} h(t - T), \quad (10)$$

где  $h(t), t \geq 0$ , – переходная функция ЛКС, как отклик канала на единичный скачок напряжения, связана с импульсной реакцией ЛКС  $q(t), t \geq 0$ , соотношением [22]:  $q(t) = dh(t) / dt$ .

Для решения поставленной задачи формирования ФМС без последействия удобнее перейти в (9) и (10) от сигма-функции и переходной функции канала к дельта-функции и импульсной реакции канала связи.

Дифференцируя  $x(t)$ , приходим к новому ФМС на входе ЛКС

$$x'(t) = \frac{dx}{dt} = \delta(t) + 2 \sum_{k=1}^n (-1)^k \delta(t - t_k) + (-1)^{n-1} \delta(t - T), \quad (11)$$

где  $\delta(t) = d\sigma(t) / dt$  – дельта-функция Дирака.

Дифференцируя  $y(t)$ , приходим к новому ФМС на выходе ЛКС

$$y'(t) = \frac{dy}{dt} = q(t) + 2 \sum_{k=1}^n (-1)^k q(t - t_k) + (-1)^{n-1} q(t - T), \quad (12)$$

После определения функций  $x'(t)$  и  $y'(t)$ , на основании обратных преобразований:  $\sigma(t) = \int_{-\infty}^t \delta(t) dt$  и  $h(t) = \int_{-\infty}^t q(t) dt$ , можно найти искомые сигналы  $x(t)$  в (9) и  $y(t)$  в (10).

Для того, чтобы функция  $y'(t)$  (а значит и функция  $y(t)$ ) была финитной на интервале  $0 \leq t \leq T$ , необходимо потребовать, чтобы выполнялось следующее условие

$$y'(t \geq T) = q(t) + 2 \sum_{k=1}^n (-1)^k q(t - t_k) + (-1)^{n-1} q(t - T) = 0. \quad (13)$$

Соотношение (13) в неявном виде задает решение поставленной задачи по формированию ограниченных по длительности сигналов без последействия, т.е. не вызывающих переходного процесса на выходе ЛКС.

С целью получения необходимых условий для решения поставленной задачи в явном виде рассмотрим конкретные модели каналов связи, характеризующиеся соотношениями (4) - (8).

### **Исследование условий отсутствия последействия в отклике ЛКС**

При подаче на вход ЛКС ФМС  $x(t)$  с регулируемым моментами времени  $t_k, k = 1, 2, \dots, n, 0 \leq t_k \leq T$ , на выходе ЛКС наблюдается сигнал  $y(t)$ , в котором после момента  $T$  (момента окончания сигнала  $x(t)$ ) из-за инерционных свойств ЛКС наблюдается переходной процесс, зависящий от вида его импульсной реакции. При последовательной передаче двоичных данных, если не предпринимать никаких мер по регулировке моментов  $t_k, k = 1, 2, \dots, n$ , скорость передачи данных определяется так:  $V_q = 1 / (T + \tau_q)$ , где  $\tau_q$  - длительность переходного процесса (последействия) в ЛКС.

Очевидно, что для повышения скорости передачи данных до величины  $V = 1 / T$ , моменты времени  $t_k, k = 1, 2, \dots, n$ , следует выбирать такими, чтобы обнулить последействие. Рассмотрим условия отсутствия последействия в ЛКС для различных его моделей.

#### **ЛКС с простыми вещественными полюсами**

Импульсная реакция такого ЛКС определяется соотношением (4). Подставляя  $q_1(t)$  в (13), приходим к следующему выражению

$$\sum_{i=1}^n c_i e^{-\alpha_i t} \left[ 1 + 2 \sum_{k=1}^n (-1)^k e^{\alpha_i t_k} + (-1)^{n-1} e^{\alpha_i T} \right] = 0, \quad t \geq T. \quad (14)$$

Отсутствие последействия в таком ЛКС выполняется, если моменты  $t_k, k = 1, 2, \dots, n$ , определяются из решения системы нелинейных уравнений вида

$$\left[ 1 + 2 \sum_{k=1}^n (-1)^k e^{\alpha_i t_k} + (-1)^{n-1} e^{\alpha_i T} \right] = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (15)$$

Вычислив по (15) моменты  $t_k, k = 1, 2, \dots, n$ , полностью определяются сигналы (9) и (10) на интервале  $T$ .

#### **ЛКС с кратными вещественными полюсами**

Импульсная реакция такого ЛКС определяется соотношением (5). Подставляя  $q_2(t)$  в (13), приходим к следующему выражению

$$\sum_i c_i [\alpha_i] e^{-\alpha_i t} \left[ 1 + 2 \sum_{k=1}^n (-1)^k e^{\alpha_i t_k} + (-1)^{n-1} e^{\alpha_i T} \right] = 0, \quad t \geq T. \quad (16)$$

Данное выражение, с учетом линейного дифференциального оператора в (5)-(6), после ряда преобразований приводится к следующей системе уравнений:

$$\frac{d^r}{d\alpha_i^r} \left[ 1 + 2 \sum_{k=1}^n (-1)^k e^{\alpha_i t_k} + (-1)^{n-1} e^{\alpha_i T} \right] = 0, \quad (17)$$

$$i = 1, 2, \dots, \quad r = 0, 1, 2, \dots, (m_i - 1).$$

Вычислив по (17) моменты  $t_k, k = 1, 2, \dots, n$ , полностью определяются сигналы (9) и (10) на интервале  $T$ .

#### **ЛКС с комплексными полюсами**

Импульсная реакция такого ЛКС определяется соотношением (7). Подставляя  $q_3(t)$  в (13), приходим к следующему выражению

$$\operatorname{Re} \sum_{i=1}^{n/2} \dot{c}_i e^{-\alpha_i t} \left[ 1 + 2 \sum_{k=1}^n (-1)^k e^{\alpha_i t_k} + (-1)^{n-1} e^{\alpha_i T} \right] = 0, \quad t \geq T. \quad (18)$$

Переходя от комплексных к вещественным величинам, после ряда преобразований, данное выражение сводится к следующей системе уравнений

$$\begin{cases} 1 + 2 \sum_{k=1}^n (-1)^k e^{\alpha_i t_k} \cos \beta_i t_k + (-1)^{n-1} e^{\alpha_i T} \cos \beta_i T = 0, \\ 2 \sum_{k=1}^n (-1)^k e^{\alpha_i t_k} \sin \beta_i t_k + (-1)^{n-1} e^{\alpha_i T} \sin \beta_i T = 0, i = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (19)$$

Вычислив по (19) моменты  $t_k, k=1, 2, \dots, n$ , полностью определяются сигналы (9) и (10) на интервале  $T$ .

### ЛКС с кратными комплексными полюсами

Импульсная реакция такого ЛКС определяется соотношением (8). Подставляя  $q_4(t)$  в (13), приходим к следующему выражению

$$\operatorname{Re} \sum_i \dot{c}_i [\dot{\alpha}_i] e^{-\alpha_i t} \left[ 1 + 2 \sum_{k=1}^n (-1)^k e^{\alpha_i t_k} + (-1)^{n-1} e^{\alpha_i T} \right] = 0, t \geq T. \quad (20)$$

После ряда преобразований, с учетом комплексного дифференциального оператора в (8), находим условие отсутствия переходного процесса для такого ЛКС в виде

$$\begin{cases} \frac{d^r}{d\alpha_i^r} \left[ 1 + 2 \sum_{k=1}^n (-1)^k e^{\alpha_i t_k} \cos \beta_i t_k + (-1)^{n-1} e^{\alpha_i T} \cos \beta_i T \right] = 0, \\ \frac{d^r}{d\alpha_i^r} \left[ 2 \sum_{k=1}^n (-1)^k e^{\alpha_i t_k} \sin \beta_i t_k + (-1)^{n-1} e^{\alpha_i T} \sin \beta_i T \right] = 0, \end{cases} \quad (21)$$

$i = 1, 2, \dots, \quad r = 0, 1, \dots, (m_i - 1)$ .

Решение системы (21) относительно  $t_k$  полностью определяют функции (11) и (12), а значит и искомые сигналы  $x(t)$  (9) и  $y(t)$  (10),  $0 \leq t \leq T$ .

Итак, системы уравнений (15), (17), (19) и (21) позволяют полностью решить поставленную задачу по нивелированию переходного процесса в ЛКС и формированию ФМС без последствия.

### **Примеры расчета моментов изменения полярности в ФМС**

**Пример 1.** Рассмотрим модель ЛКС с простыми полюсами первого порядка. Импульсная реакция такого ЛКС согласно (3) и (4) равна:  $q_1(t) = \alpha_1 e^{-\alpha_1 t}, t \geq 0$ , где полюс  $\alpha_1$  определяется граничной частотой  $F_g$  АЧХ ЛКС и соответственно равен:  $\alpha_1 = 2\pi F_g$ .

Уравнение (15) для этого случая записывается в виде

$$1 - 2e^{\alpha_1 t_1} + e^{\alpha_1 T} = 0,$$

решая которое относительно момента  $t_1$  приходим к следующему соотношению

$$t_1 = \frac{1}{\alpha_1} \ln \left[ 0.5(1 + e^{\alpha_1 T}) \right].$$

Замечаем, что момент времени  $t_1$  перехода через ноль, зависит от длительности сигнала и от граничной частоты.

На рисунке 1 для параметров  $T_x = 2$  мс или  $V_x = 1/2 = 0.5$  кГц и  $F_g = 0.55$  кГц приведены сигналы на входе и выходе ЛКС, представляющего собой ФНЧ Баттерворта 1-го порядка.

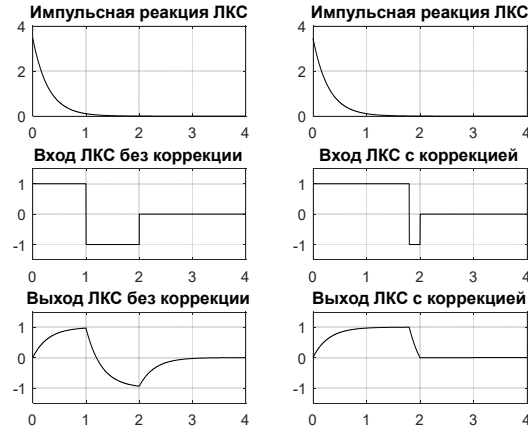


Рис. 1. Сигналы для ЛКС 1-го порядка

Левые графики характеризуют случай отсутствия коррекции момента времени перехода через ноль во входном сигнале. Здесь момент  $t_1$  выбран равным 1 мс. При этом в выходном сигнале наблюдается последствие, приводящее к увеличению длительности отклика ЛКС до величины  $T_y = 3$  мс, что соответствует уменьшению скорости передачи на выходе ЛКС до величины  $V_y = 1/3 = 0.333$  кГц.

Правые графики характеризуют вариант коррекции момента времени перехода через ноль в соответствии с известными параметрами ЛКС. Здесь момент  $t_1$  выбран равным  $t_1 = 1.7997$  мс. При этом в выходном сигнале нет последствия, что приводит к увеличению скорости отклика ЛКС до величины  $V_y = 0.5$  кГц.

**Пример 2.** Рассмотрим модель ЛКС второго порядка, но с разными простыми полюсами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

Уравнение (15) для этого случая записывается в виде системы из двух нелинейных уравнений

$$\begin{cases} e^{\alpha_1 t_1} - e^{\alpha_1 t_2} = 1 - e^{\alpha_1 T}, \\ e^{\alpha_2 t_1} - e^{\alpha_2 t_2} = 1 - e^{\alpha_2 T}. \end{cases}$$

Приведем последовательность преобразований этой системы для получения искомого результата для моментов времени  $t_1$  и  $t_2$ .

$$\begin{aligned} & \begin{cases} 1 - e^{\alpha_1(t_2 - t_1)} = (1 - e^{\alpha_1 T}) / e^{\alpha_1 t_1}, \\ 1 - e^{\alpha_2(t_2 - t_1)} = (1 - e^{\alpha_2 T}) / e^{\alpha_2 t_1}. \end{cases} \Rightarrow \\ & \Rightarrow \begin{cases} \frac{1}{\alpha_1} \ln [1 - (1 - e^{\alpha_1 T}) / e^{\alpha_1 t_1}] = (t_2 - t_1) = \Delta t, \\ \frac{1}{\alpha_2} \ln [1 - (1 - e^{\alpha_2 T}) / e^{\alpha_2 t_1}] = (t_2 - t_1) = \Delta t. \end{cases} \end{aligned}$$

Из последней системы, при вычисленном моменте времени  $t_1$ , определяется разность  $\Delta t$  и затем следующий момент времени  $t_2 = t_1 + \Delta t$ . Теперь для расчета момента  $t_1$  из последнего соотношения приходим к равенству

$$\begin{aligned} & [1 - (1 - e^{\alpha_1 T}) / e^{\alpha_1 t_1}]^{\alpha_2} = [1 - (1 - e^{\alpha_2 T}) / e^{\alpha_2 t_1}]^{\alpha_1} \Rightarrow \\ & \Rightarrow [e^{\alpha_1 t_1} - (1 - e^{\alpha_1 T})]^{\alpha_2} \frac{1}{e^{\alpha_1 \alpha_2 t_1}} = [1 - (1 - e^{\alpha_2 T}) / e^{\alpha_2 t_1}]^{\alpha_1} \Rightarrow \\ & \Rightarrow \frac{[e^{\alpha_1 t_1} - (1 - e^{\alpha_1 T})]^{\alpha_2}}{[1 - (1 - e^{\alpha_2 T}) / e^{\alpha_2 t_1}]^{\alpha_1}} = e^{\alpha_1 \alpha_2 t_1} \Rightarrow \\ & t_1 = \frac{1}{\alpha_1 \alpha_2} \ln \frac{[e^{\alpha_1 t_1} - (1 - e^{\alpha_1 T})]^{\alpha_2}}{[1 - (1 - e^{\alpha_2 T}) / e^{\alpha_2 t_1}]^{\alpha_1}}. \end{aligned}$$

Из данного нелинейного соотношения следует, что момент времени  $t_1$  можно определить только на основе метода последовательных приближений.

### Заключение

Развитие современных систем связи 4-5 G предполагает постоянное увеличение скорости передачи данных при наличии в линейном канале связи с памятью мешающих факторов в виде частотно-временного рассеяния. Традиционные методы построения систем передачи данных, при которых информация о параметрах канала связи доступна только на приемной стороне, имеют теоретические ограничения, препятствующие потенциальному росту скорости передачи данных. Поэтому в «гонке» за спектральной эффективностью разработка новых методов приемо-передачи, основанных на знании оценок канала на приемной и на передающей сторонах становится актуальной.

Формированию биполярных ФМС, не вызывающих переходного процесса на выходе ЛКС, для таких систем и посвящена данная работа. В ней для различных моделей ЛКС получены общие условия отсутствия переходного процесса в отклике ЛКС, позволяющие рассчитать такие моменты перехода через ноль на входе ЛКС, при которых скорость его отклика не уменьшается по сравнению с входным ФМС. Полученные результаты подтверждены расчетами и иллюстрируются графиками.

Следует отметить, что для практической реализации предложенного метода формирования ФМС требуется:

- 1) разработать метод решения нелинейных уравнений для вычисления искомых моментов времени в ФМС;
- 2) разработать метод оценки на приеме по зашумленным сигналам искомых моментов времени;
- 3) разработать структурную схему СПД с обратной связью для доставки полученных оценок на передачу.

Эти вопросы требуют дальнейших исследований и будут представлены в последующих работах авторов.

### Литература

1. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости. М.: Госэнергоиздат, 1956. 152 с.
2. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. М.: Сов. радио, 1970. 728 с.
3. Зюко А.Г., Фалько А.И., Панфилов И.П. и др. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации. М.: Радио и связь, 1985. 272 с.
4. Сердюков П.Н., Бельчиков А.В., Дронов, А.Е., Григорьев А.С., Волков С.С. Защищенные радиосистемы цифровой передачи информации. – М.: АСТ, 2006. – 403 с.
5. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи. Основы теории и принципы реализации. М.: Наука, 2009. 358 с.
6. Аджемов А.С., Санников В.Г. Общая теория связи. Учебник для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 624 с.
7. Яблов В.В., Коробков Д.Л., Портной С.Л. Высокоскоростная передача сообщений в реальных каналах. М.: Радио и связь, 1991. 288 с.
8. Макаров С.Б., Цикин И.А. Передача дискретных сообщений по радиоканалам с ограниченной полосой пропускания. М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
9. Николаев Б.И. Последовательная передача дискретных сообщений по непрерывным каналам с памятью. М.: Радио и связь, 1988. 264 с.
10. Клюев В.И. Частотно-временные преобразования и прием дискретных сигналов в системах связи. М.: Радио и связь, 1990. 208 с. (СТС. Вып. 32).
11. Герст, Даймонд. Устранение интерференции между передаваемыми знаками с помощью формирования входного сигнала // ТИИЭР. 1961. № 7. С. 28-36.
12. Орховский Р.И. Коррекция формы импульса по коэффициенту передачи линейной системы // Радиотехника. 1971. Т. 26. № 3. С. 4.
13. Ямпольский Э.М. Вариационные принципы согласования сигналов с каналом связи. М.: Радио и связь, 1987. 136 с.
14. Маригодов В.К., Бабуров Э.Ф. Синтез оптимальных радиосистем с адаптивным предсказанием и корректированием сигналов. М.: Радио и связь, 1985. 248 с.
15. Бельфиоре К.А., Парк Дж. Х. Компенсация посредством решающей обратной связи // ТИИЭР. 1979. Т. 67. № 8. С. 67-83.

16. *Пармонов А.А.* Прием дискретных сигналов в присутствии межсимвольных помех. Адаптивные выравниватели // Зарубежная радиоэлектроника. 1985. № 9. С. 36-60.
17. *Тамм Ю.А.* Адаптивная коррекция сигналов ПД. М.: Связь, 1978. 144 с.
18. *Санников В.Г., Альнувейни С.А.* Помехоустойчивость оптимального когерентного модема двоичных сигналов в каналах с межсимвольной интерференцией // Естественные и технические науки. № 3 (41). 2009. С. 319-332.
19. *Санников В.Г., Альнувейни С.А.М.* Потенциальная помехоустойчивость системы передачи двоичных сообщений по проводному каналу связи. Труды МНТК "Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения". М.: МИРЭА-ЦНИИ "Электроника", 2011. Часть 2. С. 242-245.
20. *Санников В.Г.* Помехоустойчивость системы передачи оптимальных финитных сигналов по телефонному каналу связи // Электросвязь, № 5, 2013. С. 39-44.
21. *Санников В.Г.* Метод оптимизации радиотелефонной связи // Журнал Радиоэлектроники: электронный журнал. 2014, № URL: <http://ire.cplire.ru/jre/nov14/17/text.pdf>.
22. *Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И.* Основы теории цепей. Учеб. для вузов. М.: Радио и связь, 2003. 592 с.
23. *Голдсмит А.* Беспроводные коммуникации / Пер. с англ. Н. Л. Бирюкова, Н. Р. Триски; под ред. В. А. Безрезовского. М.: Техносфера, 2011.

## МЕТОДОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СВЕТ-СИГНАЛ

**Федоров Владимир Дмитриевич,**

*Московский Технический Университет Связи и Информатики, ассистент кафедры ТиЗВ,  
Москва, Россия,  
[v.d.fedorov@mtuci.ru](mailto:v.d.fedorov@mtuci.ru)*

**Кудряшов Всеволод Владимирович,**

*Московский Технический Университет Связи и Информатики, ассистент кафедры ТиЗВ,  
Москва, Россия,  
[v.v.kudryashov@mtuci.ru](mailto:v.v.kudryashov@mtuci.ru)*

**Власюк Игорь Викторович,**

*Московский Технический Университет Связи и Информатики, к.т.н., доцент каф. ТиЗВ,  
Москва, Россия,  
[ru3dlp@yandex.ru](mailto:ru3dlp@yandex.ru)*

### **Аннотация**

*При измерении разрешающей способности и динамического диапазона преобразователей свет-сигнал возникает проблема сопоставлением результатов отдельных результатов измерений с фактическим качеством формируемого изображения. При раздельном измерении этих параметров не всегда можно достоверно дать оценку устройству, современные преобразователи свет-сигнал адаптируются к существующим простейшим тестовым изображениям и могут показать заведомо большие параметры и характеристики, чем позволяют это их физические возможности, в силу работы встроенных реставрационных алгоритмов, что невозможно при работе с реальными изображениями. Необходимо создание универсальной методики оценки, включающей в себя комплектное измерение пространственно-динамических характеристик преобразователей свет-сигнал. Такая методика предлагается в данной работе.*

**Ключевые слова:** *Разрешающая способность, частотно-контрастная характеристика, динамический диапазон, телевизионные измерения, e-SFR.*

### **Введение**

Классический метод оценки качества преобразователей свет-сигнал включает в себя раздельное измерение: разрешающей способности, динамического диапазона, оценки точности передачи цветовой компонент и оценки в движении.

Наиболее точная и чаще всего используется методика, дающая наибольшее количество информации о разрешающей способности, измеряется по стандарту ISO 12233:2017 [1], горизонтальная и вертикальная четкость результирующего изображения, выражается в телевизионных линиях. Измерение разрешающей способности камеры проводится при освещенности, на которой достигается наибольшее ОСШ с использованием тестовой таблицы. Измерения проводятся отдельно для снимка, полученного средствами камеры, и для стоп-кадра из видеоряда.

Оценку разрешающей способности проводят по кадрам, полученным после установки, настройки и позиционирования камеры относительно тестовой таблицы.

Метод измерения заключается в оценке экспертами «приемлемости» фрагмента изображения испытательной таблицы (ИТ), демонстрируемого на видеоконтрольном устройстве, отображающем сигнал изображения тестируемой видеокамеры, содержащей ИТ. Указанный фрагмент ИТ должен содержать синусоидальное изменение коэффициента отражения от максимального до минимального с пространственным периодом, равным  $2h/RES$ , где  $h$  – высота активной части испытательной таблицы,  $RES$  – оцениваемое количество телевизионных линий. Указанной оценке подвергается или изображения фрагментов ИТ, содержащие пачки различных пространственных частот, или изображение фрагмента с переменной пространственной частотой.

Метод изменения разрешающей способности на основе анализа частотно-контрастной характеристики.

Определение параметра «разрешающая способность» осуществляется путем нахождения граничной частоты на частотно-контрастной характеристике (ЧКХ) тестируемой видеокамеры, на которой контраст изображения снижается до порогового значения относительно контраста на достаточно низкой опорной частоте.

Для определения ЧКХ телевизионной камеры на поверхности ее светочувствительной матрицы формируют изображение ИТ. ЧКХ определяется по области изображения с элементом ИТ, имеющим черно-белый перепад яркости, например, область ИТ В5, ГОСТ 14872-82 или ISO 12233-2017 [1,2]. В предварительно выбранной оператором области перехода начиная от строки  $y_0$  высотой  $h$  выполняют двукратное дифференцирование верхней и нижней ее строк путем свертки изображения с ядром  $[-1 \ 0 \ 1]$  с последующим поиском координат максимума значения полученных откликов, соответственно,  $x_0$  и  $x_1$ . По найденным значениям координат строят прямую границы областей вида

$$y(x) = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} h + y_0 \quad (1)$$

Смещаясь от найденных координат  $x_0$  и  $x_1$  по обе стороны по строке, контролируют сигнал яркости. По достижении значений яркости 0,1 и 0,9 от максимального в обоих указанных строках значения, соответственно, определяют границы черной и белой области перехода. Таким образом определяют области чёрного и белого как имеющие координаты по оси абсцисс, соответственно, более удаленные от линии границы, чем уровень яркости 0,1 и 0,9 от максимального в контрольных строках и все значения координат в столбцах. Формируют массив данных размером  $1 \times 4 \times X$ , где  $X$  – размер выбранной области по строке. Заполняют указанный массив по следующему правилу. Каждый четвертый отсчет массива, начиная с первого заполняют нижней строкой выбранной области перехода. Предыдущую по высоте строку выбранной области перехода помещают в каждый четвертый элемент массива, начиная с позиции, смещенной на округленную до целого учетверенную величину протяженности проекции отрезка прямой границы  $x(y)$  высотой в одну строку на ось абсцисс в направлении ее наклона. При совпадении координат полученной сетки заполнения значений элементов строки в созданный массив с координатами уже заполненных элементов выполняют усреднение всех значений элементов массива, подлежащих записи в ячейки с одними и теми же координатами. Указанный процесс итеративно повторяется до достижения верхней строки выделенной области включительно. Заполненный одномерный массив данных дифференцируют путем дискретной свертки с импульсной характеристикой  $[-1 \ 1]$  и выполняют быстрое преобразование Фурье результата [3,4,5]. Абсолютное значение полученных данных подвергают обратной гамма-коррекции. Строят график зависимости полученной функции «Частотно-контрастной характеристики», ЧКХ от аргумента «пространственная частота» до значения  $1/4$  от его максимума  $f_{max}$ . Значение этого максимума считают максимальной частотой сигнала равной  $1/2$  частоты дискретизации. Фиксируют значение ЧКХ на указанной частоте. Фиксируют относительную частоту сигнала по уровням ЧКХ 0,5 и 0,1 от значения ЧКХ на нулевой частоте. Для учета помех от искажений муарового типа вычитают из отсчетов значений ЧКХ в диапазоне  $[0: f_{max}/4]$  значения ЧКХ в диапазоне  $[f_{max}/4: f_{max}/2]$ . Фиксируют значения аргумента (относительной частоты) найденной функции «ЧКХ Корр.» при ее значениях, равных 0,5 и 0,1 от значений ЧКХ Корр на нулевой частоте.

Для оценки воспроизводимых градаций яркости используют специальный градационный клин, градационные полосы на испытываемой таблице имеют различные коэффициенты отражения (светопропускания). Одинарный переход от самой светлой полоске к темной позволяет оценить линейность преобразования свет-сигнал. При использовании градационного клина у нас присутствует коэффициенты отражения для самой светлой полоски  $\rho_c$  и  $\rho_m$  для самой темной соответственно, контраст таблицы будет равен:

$$\beta = \frac{\rho_c}{\rho_m} \quad (2)$$

Логарифм коэффициента отражения возрастает с увеличением номера полоски



$$p_m = p_c \beta^{(m-M)/(M-1)} \quad (3)$$

Таблицы отражательного типа имеют недостаток, связанный с тем, что при измерении ДД необходимо делать множество смещений экспозиций, а потом объединять результаты измерений и строить общую характеристику [6,7]. Для камер с неотключаемыми авторегулировками данный метод не позволяет обеспечить фиксированное изменение экспозиции в 2 раза, в силу различных особенностей, кроме того, некоторые камеры вовсе не имеют управление значением экспозиции. Такой метод хорошо позволяет оценить динамический диапазон матрицы, но не камеры в целом.

Для определения динамического диапазона телевизионной камеры на поверхности ее светочувствительной матрицы формируют изображение ИТ.

Таблица устанавливается таким образом, чтобы кадр был вписан в рамку, вертикальные границы рамки касались границ кадра, а область с активной частью таблицы находилась по центру кадра [8].

Яркость области определяется по следующей формуле:

$$\bar{E}_i = \frac{\sum_{x=x_{i1}'}^{x_{i2}'} \sum_{y=y_{i1}'}^{y_{i2}'} E(x, y)}{(x_{i2}' - x_{i1}') (y_{i2}' - y_{i1}')} \quad (4)$$

где

$x_{i1}'$ ,  $x_{i2}'$ ,  $y_{i1}'$ ,  $y_{i2}'$  границы центральной части области,

$E(x, y)$  – яркость отсчёта.

Границы центральной части области определяются как:

$$\begin{aligned} x_{i1}' &= x_{i1} + 0.1(x_{i2} - x_{i1}); \\ x_{i2}' &= x_{i2} - 0.1(x_{i2} - x_{i1}); \\ y_{i1}' &= y_{i1} + 0.1(y_{i2} - y_{i1}); \\ y_{i2}' &= y_{i2} - 0.1(y_{i2} - y_{i1}); \end{aligned} \quad (5)$$

где

$x_{i1}$ ,  $x_{i2}$  – координаты левой и правой границ,

$y_{i1}$  и  $y_{i2}$  – координаты верхней и нижней границ области одной яркости.

Яркость отсчёта, определяющаяся по следующей формуле:

$$E(x, y) = 0.21r(x, y) + 0.72g(x, y) + 0.07b(x, y) \quad (6)$$

где

$r(x, y)$ ,  $g(x, y)$ ,  $b(x, y)$  – красная, зелёная и синяя компоненты соответственно отсчёта, расположенного в координатах  $x$ ,  $y$ .

Отношение сигнал/шум для заданной области можно найти как:

$$SNR_i = -20 \log_{10} \left( \frac{\sqrt{\frac{\sum_{x=x_{i1}'}^{x_{i2}'} \sum_{y=y_{i1}'}^{y_{i2}'} (E(x, y) - \bar{E}_i)^2}{(x_{i2}' - x_{i1}') (y_{i2}' - y_{i1}') - 1}}{\bar{E}_{i-1} - \bar{E}_i}}}{\bar{E}_{i-1} - \bar{E}_i} \right) \quad (7)$$

где

$\bar{E}_i$  и  $\bar{E}_{i-1}$  – яркости текущей и соседней слева области соответственно,  $x_{i1}'$ ,  $x_{i2}'$ ,  $y_{i1}'$ ,  $y_{i2}'$  определяются по (5).

Существует тестовая таблица Imatest 36-Patch Dynamic Range [6] с 36-областями с широким динамическим диапазоном (HDR) (Рисунок 1) с шагом плотности светофильтров от 0,1 до 0,3 и максимальной не менее базового +5 (~17 f-стопов), рекомендуется для традиционных измерений динамического диапазона.

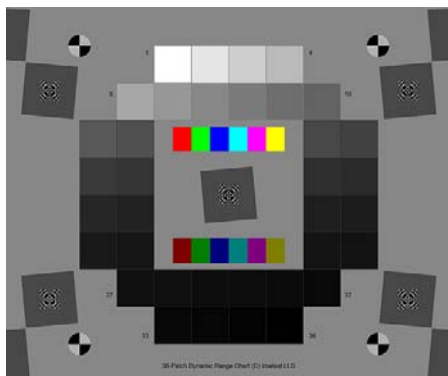


Рис. 1. Imatest таблица с 36-областями HDR

Почти круговое расположение квадратов гарантирует, что виньетирование оказывает минимальное влияние на результаты. Недостатком данной таблицы служит ограниченное число контрастных серых переходов, общий уровень серого не соответствует 18% критичный при обратной гамма-коррекции в камере. Также в комплексе измерений нет совместной оценки разрешающей способности и динамического диапазона.

#### Метод создания универсальной испытательной таблицы.

Для решения задачи создания универсальной испытательной таблицы предлагается метод распределения контрастных элементов (нейтральных светофильтров). Каждый из квадратов таблицы представлен оттенком серого (от белого, что соответствует отсутствию светофильтра до черного, с максимальными ослаблением по яркости) и распределен по определенному закону, отвечающему условиям:

1. На полученном изображении должны присутствовать все возможные линии соприкосновения квадратов с разными оттенками. Все возможные перепады яркости в пределах ДД.
2. Изображение должно формироваться по одному алгоритму вне зависимости от количества исходных оттенков.
3. Граница исходной прямоугольной поверхности должна быть заполнена последовательностью квадратов, где оттенок соседнего обязательно отличается.
4. Прямоугольная поверхность должна содержать минимальное количество квадратов, с учетом выполнения всех предыдущих условий.
5. При расчете среднего значения плотности светофильтров изображения по совокупности всех квадратов, размещенных на поверхности, должно быть 82% от максимального (черного), что соответствует 50% уровню серого для гамма скорректированного изображения.

Для решения данной задачи был выработан следующий алгоритм. Для выполнения условия 1 предлагается замостить поверхность при помощи простых элементов. На рисунке 2 представлен такой элемент - «цветок».

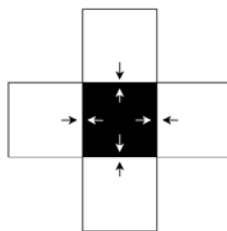


Рис. 2. Элемент замощения поверхности

Стрелками на рисунке показано количество границ, содержащихся в одном элементе. Границы различаются как геометрическим положением, так и последовательностью оттенков. Если требуется разместить на поверхности дополнительные оттенки, то «лепесток» для нескольких «цветков» может быть общим как представлено на рисунке 3.

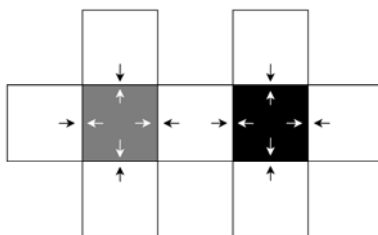


Рис. 3. Использование «лепестка» для нескольких оттенков

Такой подход позволяет выполнять условие с использованием меньшего количества квадратов. Также формируется полоска из «цветков» с общими лепестками в центре каждого из цветков будет один из представленных исходных оттенков. Таким образом данный метод решает условие масштабируемости.

Для отображения границ между оттенками, расположенными в центрах «цветков» составляющих основную полоску, составляются собственные «цветы», которые размещаются так что один из лепестков должен граничить с общим «лепестком» основной полоски. Пример размещения представлен на рисунке 4. Граница с общим «лепестком» основной полоски отмечена красным.

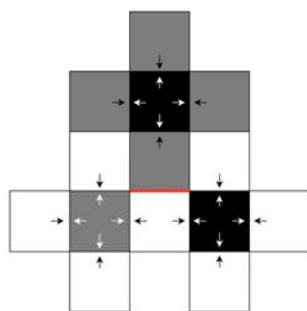


Рис. 4. Формирование дополнительной полосы «цветов»

Важно, что каждый следующий ряд будет иметь на один «цветок» меньше. Таким образом формируется «клин» размер, которого зависит от количества исходных оттенков. Если замостить оставшееся пространство черными квадратами для приближения к условию получения среднего значения тусклости цвета в 82%, то для 16 оттенков выйдет результат, который представлен на рисунке 5.

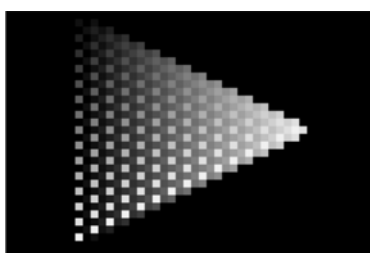


Рис. 5. Выполнение условия по 81% тусклости цвета

Выполнение условия по значению плотности светофильтров, за счет увеличения количества черных квадратов не позволяет соблюсти условия по минимальному количеству квадратов и условие на формирование границ из неповторяющихся элементов. Поэтому условие на 82% плотности светофильтров должно быть выполнено не за счет количества элементов, а за счет снижения показателя яркости для всех оттенков пропорционально. Условие по формированию границ прямоугольника выполняется за счет «разделения» полученного треугольника с избыточностью позволяющей сохранить все комбинации переходов. Как это представлено на рисунке 6.

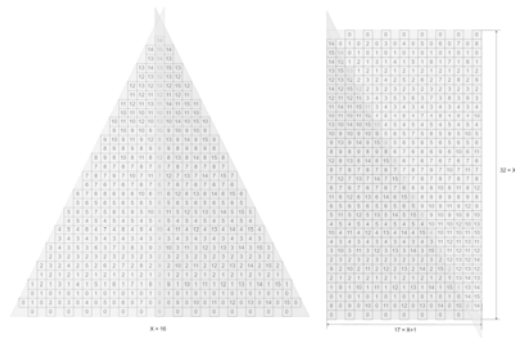


Рис. 6. Получение оптимального замощения

Данный подход позволяет масштабировать размер схемы в зависимости от количества используемых уровней градиента оттенков серого.

Формула зависимости количества элементов на схеме от количества уровня градиентов представлена в следующем виде:

$$Y(X) = 2X(X + 1) \quad (8)$$

Где  $X$  – количество оттенков серого,  $Y(X)$  – количество квадратов на схеме

$$A(X) = 2X \quad (9)$$

$$B(X) = X + 1 \quad (10)$$

$A(X)$  – Высота схемы в квадратах,  $B(X)$  – ширина схемы в квадратах

$$S(X) = \frac{X + 1}{2X}, \text{ при } X \rightarrow \infty, S(X) = \frac{1}{2} \quad (11)$$

$S(X)$  – Соотношение сторон схемы

Опираясь на результат расчетов, можно определить форму элемента в виде прямоугольника или изменить её ориентацию целиком для достижения необходимого соотношения сторон схемы.

Достоинством данного метода является использование минимального количества элементов для построения схемы, содержащей все переходы между оттенками и возможность синтезировать схему для любого количества оттенков градиента. Недостатком данного метода является не возможность произвольно задать соотношение сторон схемы, и среднее значение оттенка цвета по схеме, также полученный тестовый элемент может некорректно восприниматься камерой из-за настроек автоматической экспозиции.

Альтернативном подходом служит распределение квадратов по случайному закону с учетом вышеизложенных требований. Простейшим вариантом может стать генерация таблицы по методу Монте-Карло. Например, возьмем количество контрастных переходов 10, а размеры 16 на 9. Тогда, с помощью написанной программы сгенерируем матрицу элементов. Представим значения градиента, соответствующее каждому квадрату в виде матрицы:

$$\begin{pmatrix} 6 & 8 & 10 & 1 & 6 & 0 & 0 & 10 & 6 & 8 & 4 & 1 & 5 & 6 & 10 \\ 9 & 1 & 1 & 6 & 1 & 8 & 4 & 5 & 9 & 1 & 0 & 4 & 2 & 0 & 0 & 8 \\ 10 & 9 & 2 & 4 & 1 & 3 & 1 & 1 & 7 & 7 & 1 & 3 & 8 & 10 & 10 & 7 \\ 7 & 2 & 0 & 3 & 7 & 8 & 7 & 9 & 3 & 5 & 2 & 10 & 5 & 6 & 8 & 10 \\ 6 & 10 & 5 & 3 & 3 & 2 & 9 & 5 & 10 & 10 & 9 & 4 & 7 & 1 & 8 & 10 \\ 2 & 4 & 8 & 0 & 0 & 7 & 0 & 1 & 2 & 4 & 0 & 6 & 1 & 1 & 7 & 1 \\ 10 & 1 & 8 & 8 & 4 & 6 & 4 & 5 & 4 & 5 & 4 & 8 & 10 & 2 & 2 & 2 \\ 8 & 2 & 8 & 1 & 8 & 8 & 10 & 9 & 10 & 3 & 1 & 9 & 1 & 2 & 4 & 8 \\ 3 & 8 & 5 & 5 & 3 & 10 & 5 & 6 & 0 & 3 & 6 & 5 & 2 & 2 & 2 & 10 \end{pmatrix} \quad (12)$$

Визуализируя матрицу, получаем тестовое изображение, отвечающее требованиям и показывающее распределение квадратов градиента серого для заданных параметров (рис. 7).

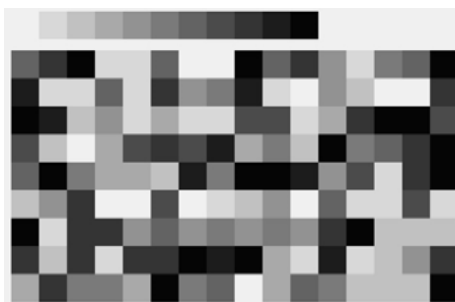


Рис. 7. Тестовое изображение матрицы уровней градиента

Для проверки корректности распределения вычисляем количество различных соседей в матрице и получаем общее число контрастных переходов между квадратами.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	7	0	0	0	0	0	0	0	0	1
3	9	6	0	0	0	0	0	0	0	2
4	4	1	3	0	0	0	0	0	0	3
6	5	8	2	1	0	0	0	0	0	4
3	5	2	4	6	1	0	0	0	0	5
4	8	1	1	4	4	1	0	0	0	6
2	9	3	3	1	2	2	1	0	0	7
4	7	6	6	7	4	6	4	5	0	8
2	6	4	1	1	5	2	3	1	1	9
4	6	6	4	5	6	4	3	11	6	3
										10

Рис. 8. Проверка комбинаций различных градиентов

Исходя из проверки следует, что все возможные контрастные переходы присутствуют (рисунок 8).

Данный метод позволяет создавать основу в виде распределения для испытательных таблиц с произвольными параметрами соотношения сторон и количества контрастных переходов. Из недостатков следует отметить необходимость производить гамма-коррекцию испытательной таблицы для соответствия 18% уровню серого.

### Методология

Эффективным методом измерения пространственно-динамических характеристик преобразователей свет-сигнал служит создания комбинированной таблицы, отвечающей следующим требованиям:

1. Наличие всех динамических переходов.

Необходимо наличие не только соседних яркостных переходов по динамическому диапазону, но и остальных.

2. Общий средний уровень серого 18%.

Стандартные испытательные таблицы делаются с учетом стандартной гамма-коррекции в  $\frac{1}{2}$  по уровню серого.

3. Простая структура.

Необходима несложная в реализации структура тестовых элементов для упрощения изготовления и использования испытательной таблицы, содержащая минимум бесполезных для измерения элементов.

4. Минимум n-переходов.

Должно учитывается минимально допустимое количество контрастных переходов (f-стопов) в количестве 13 (согласно рекомендации Imatest) [9].

Возможные измеряемые характеристики испытуемого объекта:

1. Измерение динамического диапазона.
2. Разрешающей способности.
3. Разрешения от координат и направления.

Позволяет измерять и строить карту ухудшения разрешения к периферии, некоторые сенсоры (ПЗС) могут быть изотропный разное разрешение по диагонали и вертикали.

4. Разрешения от динамического диапазона.

На высоких (особенно на высоких) или низких значениях ДД происходит ухудшение разрешающей способности, связанное с переотражением в оптическом тракте и в силу аббераций, а та же из-за нелинейности характеристик, вызванных гамма-коррекцией. Так же в большинстве видеокамер присутствует сложная цифровая обработка изображения, в том числе компрессия [10-12].

5. Разрешения от контраста.

В силу разного рода обработки при высоком контраст снижается. При низких уровнях контраста ухудшается разрешающая способность из-за системы шумоподавления

6. Периодический контраст.

На различных уровнях яркости передача контраста может отличаться для разной передачи полутонов вызванной нелинейностью эффектов преобразования свет-сигнал.

### Заключение

Предполагаемый испытательный объект дает следующие преимущества перед существующими испытательными таблицами и стендами: позволяет производить измерения основных светотехнических характеристик видеокамер, при сокращении количества необходимых инструментов (таблиц), сокращает время лабораторных испытаний, нет необходимости менять испытуемый элемент для замера различных параметров, возможность измерять все светотехнические параметры кроме временных и цветовых, косвенно возможно измерения чувствительности камеры. Недостатком будет перед использованием испытательной таблицы необходимость обязательного измерения виньетирования, который может быть скорректировано путем введения элементов одинаковой яркости. Также метод может быть ограничено пригоден при измерении параметров современных преобразователей свет-электросигнал со встроенной реставрационной обработкой, однако данный недостаток распространяется на все существующие методы измерения камер. Дальнейшая работа по улучшению данного метода измерения для практического применения требует, учитывая большое количество переходов, создания программного обеспечения для автоматизации измерений и представлении результатов.

### Литература

1. ISO 12233:2017 Photography – Electronic still picture imaging – Resolution and spatial frequency responses. –10.01.2022.
2. ГОСТ 14872-82 Таблицы испытательные оптические телевизионные. Типы, размеры и технические требования. – Введен 30.06.1983. М.: Стандартиформ, 2015.
3. ГОСТ 23456-79. Установки телевизионные прикладного назначения. Методы измерений и испытаний. – Введен 01.07.1980. М.: Стандартиформ, 1994.
4. Artmann U. VCX Version 2020 - Further development of a transparent and objective evaluation scheme for mobile phone cameras, Proc. IS&T International Sym. on Electronic Imaging, Image Quality and System Performance XVIII, IQSP-204, 2021.
5. Phillips J.B., Eliasson H. Camera image quality benchmarking, Wiley, 2018, 186 p.
6. Власюк И.В. Метод контроля пространственных характеристик телевизионных камер // Метрология и измерительная техника в связи. 2005. № 6. С. 13.
7. Кривошеев М.И. Основы телевизионных измерений. М.: Радио и связь 1989. 608 с.
8. Власюк И.В., Федоров В.Д., Савкина Д.М. Анализ элементов испытательных таблиц для контроля разрешающей способности в системах цветного телевидения // Сборник трудов XIV Международной отраслевой научно-технической конференции. 2020. С. 136-138.
9. Imatest 36-Patch Dynamic Range Test Charts <https://www.imatest.com/product/dynamic-range-test-charts> (дата обращения 20.01.2023).
10. Егоров Д.А., Федоров В.Д., Лейман В.В., Власюк И.В. Методика оценки пространственно-частотной характеристики камер на основе генеративных случайных последовательностей // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2021. С. 47-53.
11. Иванчев В.В., Власюк И.В. Метод распределения выборки цветовых оттенков в цветовом пространстве CIEXYZ // Телекоммуникации и информационные технологии. 2022. Т. 9. № 2. С. 108-119.
12. Власюк И.В., Киселева А.С. Анализ эффективности безреференсных метрик применительно к оценке качества видео при потоковой передаче // Телекоммуникации и информационные технологии. 2022. Т. 9. № 2. С. 65-74.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЦОВ

**Шерстнева Алина Анатольевна,**

*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, доцент, Санкт-Петербург, Россия*  
[shers7neva@gmail.com](mailto:shers7neva@gmail.com)

**Шерстнева Ольга Григорьевна,**

*Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, доцент,  
Новосибирск, Россия*

### **Аннотация**

*В статье приведено описание программы имитационного моделирования процесса обработки вызовов при распределенной структуре построения ЦОВ. Предлагается прогностический алгоритм сетевой маршрутизации и формулы расчета вероятностно-временных показателей. Учитываются ключевые параметры функционирования ЦОВ как системы массового обслуживания*

**Ключевые слова:** *моделирование, показатель, модель, программирование, процесс, сетевая структура, алгоритм*

### **Введение**

Известно, что телекоммуникационные системы являются сложными системами с точки зрения не только аппаратной реализации, но и расчета эффективности их производительности в реальном времени. В этой связи, имитационное моделирование позволяет прогнозировать поведение системы при применении различных стратегий организации обслуживания вызовов. Для выполнения имитационного моделирования необходимо составить сетевую модель, исследование которой позволит решить ряд телекоммуникационных задач. Одной из самых востребованных задач является оптимизационная задача. При ее решении зачастую используют методы линейного программирования [1]. Но, поскольку, задачи оптимизации характеризуются большой размерностью, для получения результата, пригодного для практического применения, вводят ряд ограничений [2]. Для моделирования функционирования ЦОВ с учетом того, что он имеет распределенный принцип построения, необходимо не только получить результаты, позволяющие влиять на его производительность, но и обеспечить программную гибкость по отношению к постоянно изменяющимся исходным данным. Для оценки производительности РЦОВ необходимо выполнить расчет вероятностно-временных параметров, характеризующих алгоритм обслуживания вызовов. А поскольку ЦОВ относится к системам массового обслуживания, то в качестве исходных данных в программу включены такие модели СМО как М/М/Ν, М/Г/Ν и модель Erlang-Α (abandonments), позволяющая учесть время терпения абонентов, распределенное по экспоненциальному закону.

### **Разработка программы моделирования**

При формировании исходных данных для построения функциональной модели РЦОВ использовался метод получения случайных чисел ( $\eta$ ), основанный на применении уравнения  $(\xi) = F(\eta)$ , где  $\xi$  - случайная величина, равномерно распределенная на интервале [0,1]. Основными компонентами стали математические модели функционирования РЦОВ, сетевая структура, математическая модель двухуровневого прогностического алгоритма обслуживания вызовов с учетом уровня квалификации операторов и повторных вызовов.

Структура моделей функционирования ЦОВ рассматривается, как совокупность алгоритмических элементов (процессов) операторского центра и наличие связей между ними. Внутренняя структура интерфейсов программы отражает структуру построения телекоммуникационной сети, включая сетевые узлы, где располагаются ЦОВ, а также отражает исследуемый процесс обслуживания вызовов, как наличие в нем свободного системного ресурса. Например, наличие свободного оператора, уровень квалификации оператора, время нахождения вызова в очереди, длина очереди, время ответа опе-

ратора и др. Системный ресурс обеспечивает сопряжение входящей информации от абонента с исходящей при заданных условиях обслуживания вызова, реализуемых в соответствующей математической модели [3].

При реализации программы в виде элемента трехмерной матрицы ( $H$ ) размерности  $[N, E, W]$   $[N, E, W]$  была выделена тройка исходных данных, характеризующих точку входа, алгоритмический элемент и уровень перехода. Занятость конкретного системного ресурса алгоритма будет однозначно соответствовать пометке о занятости в элементе  $[i, j, k]$   $[i, j, k]$  данной матрицы ( $H$ ). Пометка реализована как помещение в элемент  $[i, j, k]$  числа, равного времени окончания разговора. При поиске свободных алгоритмических ресурсов данные числа будут сравниваться с текущим временем.

В виду специфики решаемой задачи, а именно, задачи расчета вероятностно-временных показателей производительности ЦОВ при разных условиях функционирования, и, следовательно, разных алгоритмах функционирования и математических моделях, а также для исключения нарушения условий эксперимента генерирование нагрузки осуществляется равнозначно при использовании разных алгоритмов функционирования. С этой целью разработана подпрограмма предварительной генерации и записи массива вызовов, исследуемых математических моделей: `static public int [,] Mx Data Streams Destination`. Подпрограмма представляет собой двумерный массив размерности  $[M, N]$ , где  $M$  - число алгоритмических элементов, а  $N$  - число поступающих вызовов, задаваемое пользователем программы. Величина  $N$  фактически определяет величину статистической выборки, т.е. степень доверия к результату исследования (стоит брать  $N \geq 100$ ). Каждый из  $M$  столбцов данного массива представляет собой  $N$  элементов (вызовов). Каждый столбец заполняется целыми числами от 0 до 10, получаемыми генератором случайных чисел с равномерной плотностью распределения.

В связи с тем, что внутренние вызовы не представляют интереса для решаемой задачи, при совпадении номера исходящего узла и номера узла назначения осуществляется сдвиг номера входящего узла. Поток запросов характеризуется последовательностью наблюдений. Описание дается счетным процессом  $\{N(t)\}_0^\infty$ , где  $N(t) = \max\{n\} N(t) = \max\{n\}$  при  $T_n \leq t$  - интенсивность поступления вызовов на интервале  $(0; t]$ .

Другое описание процессов приведено через процессы времен между поступлениями вызовов  $\{A_n\}_1^\infty$   $\{A_n\}_1^\infty$ , где  $A_n = T_n - T_{n-1}$   $A_n = T_n - T_{n-1}$  - длина временного интервала, отделяющего поступление  $n$  от поступления  $(n-1)$  вызова. Равноценность этих процессов следует из утверждения, что  $T_n = \sum_{k=1}^n A_k$  и

из соответствия событий

$$\{N(T) = n\} \sim \{T_n \leq t < T_{n+1}\} \sim \left\{ \sum_{k=1}^n A_k \leq t < \sum_{k=1}^{n+1} A_k \right\} \{N(t) = n\} \sim \{T_n \leq t < T_{n+1}\} \sim \left\{ \sum_{k=1}^n A_k \leq t < \sum_{k=1}^{n+1} A_k \right\}$$

Данные соотношения при необходимости позволяют практически переходить от одного представления времен прихода заявок к другому.

Подпрограмма выбора заявки на обслуживание осуществляет поиск ближайшей во времени заявки из заданных массивов.

В программу введен прогностический метод маршрутизации вызовов, а алгоритм обслуживания вызовов допускает обработку повторных вызовов. В связи с этим, подпрограмма обслуживания вызовов делится на две программы, которые по очереди обсчитывают одинаковые массивы данных, и вычисляют на этапе обслуживания конкретного вызова целочисленную функцию:  $X(\delta) = \{0; 1\}$ , где  $\delta$  - совокупный параметр состояния внутрисистемных ресурсов, а 0 и 1 - соответственно отказ в обслуживании и успешность обслуживания. В итоге подсчитывается относительная статистическая частота успешности обслуживания  $P_1$ , частота отказов  $P_0 = 1 - P_1$   $P_0 = 1 - P_1$ . Результат выводится на линейной диаграмме статистических данных в виде отсчета (точки).

Логика двух основных подпрограмм, реализующих алгоритмы поиска свободных ресурсов, состоит в применении двух алгоритмов.

Первый алгоритм не использует информацию о загруженности сети. Путь между исходящим и входящим узлами сети по первому алгоритму выбирается на основе выбора критерия. Здесь используется критерий кратчайшего пути, метрика алгоритма Дейкстры (анг. Dijkstra's algorithm). Если та-



ких путей несколько, выбор между ними будет осуществляться только на этапе первого интерфейса. При разработке программы использовался рекурсивный метод поиска пути и резервирования ресурсов.

Второй алгоритм находит все пути, не содержащие циклических маршрутов, соединяющие исходящий узел и узел назначения, и учитывает информацию о состоянии загрузки сети и ее сетевых элементов. Выбор осуществляется путем максимизации функции критерия оптимальности от выбора данного маршрута.

Помимо описанных выше основных подпрограмм, имитационная программа функционирования ЦОВ включает в себя подпрограммы проверки корректности ввода данных, синхронизации и генерации случайных величин.

Пользовательский интерфейс выполнен в виде стандартного для операционной системы MS Windows оконного вида (рис. 1). Окно ввода исходных данных приведено на рисунке 2.

Окна ввода параметров настроены на прием числовых данных, и не позволяют ввести данные другого типа. Кнопка “Расчет” производит операцию обработки данных, если заполнены все поля ввода. Слева, в главном окне представлена структура исследуемой сети.

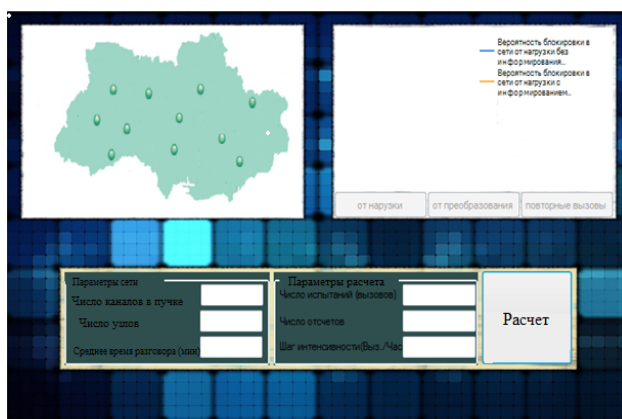


Рис. 1. Пользовательский интерфейс программы



Рис. 2. Окно ввода исходных данных

### Расчет вероятностно-временных характеристик

В течение месяца в ЦОВ поступает около трех миллионов вызовов. При их обслуживании наблюдаются временные требования, например, среднее время пост-обработки обслуженного вызова, составляет приблизительно две секунды, допустимая средняя задержка в обслуживании составляет тридцать секунд и многие другие. Однако из всех поступающих вызовов только 600–800 тысяч запрашивают обслуживание у оператора, остальные отключаются после взаимодействия с системой интерактивного речевого ответа IVR. Объектом исследования была статистика о тех клиентах, которые пожелали соединиться с оператором. Параметры нагрузки, вводимые в качестве исходных данных в программу, соответствуют нормам РД45.191-2001 ЦОВ [4, 5].

С помощью программы имитационного моделирования была исследована математическая модель двухуровневого алгоритма функционирования ЦОВ, учитывающая квалификацию операторов для

возможности равномерного распределения на них рабочей нагрузки. Целью исследований было построение графиков зависимости следующих событий:

- $P_C$  - вероятность того, что абонент, услышав голосовое меню, покинет систему;
- $P_M$  - вероятность того, что абонент, находясь в очереди на обслуживание, покинет систему, не услышав ответа оператора;
- $P_H$  - вероятность того, что абонент получит ответ оператора и покинет систему.

Расчетные формулы получены с помощью метода, опубликованного в [3]:

$$P_M = \frac{(1 - \beta_1)\omega_1}{\omega_1 + \lambda(\alpha + \delta - \alpha\delta)} \quad (1)$$

$$P_C = \frac{\alpha\lambda(1 - \delta)}{\omega_1 + \lambda(\alpha + \delta - \alpha\delta)} \quad (2)$$

$$P_M = \frac{(1 - \beta_1)}{1 + \lambda(\alpha + \delta - \alpha\delta)} \quad (3)$$

На рисунке 3 показаны графики зависимости указанных вероятностей от интенсивности поступления вызовов ( $\lambda$ ) при разных значениях вероятности передачи вызова оператору второго уровня ( $\delta$ ), вероятности неудовлетворенности обслуживанием ( $\alpha$ ), вероятности того, что вопрос передан оператору второго уровня ( $\beta_1$ ).

Полученные графики зависимости позволяют отследить изменение указанных выше вероятностно-временных характеристик в зависимости от интенсивности поступающих вызовов. Тем самым возможна корректировка алгоритма обслуживания (функционирования) ЦОВ в динамике. Что, в свою очередь, является полезной информацией для повышения производительности ЦОВ в части уменьшения потерь вызова путем сокращения времени ожидания обслуживания. Корректировка алгоритма обслуживания возможна не только на этапе эксплуатации, но и при развертывании новых ЦОВ в зависимости от целей и задач, стоящих перед компанией.

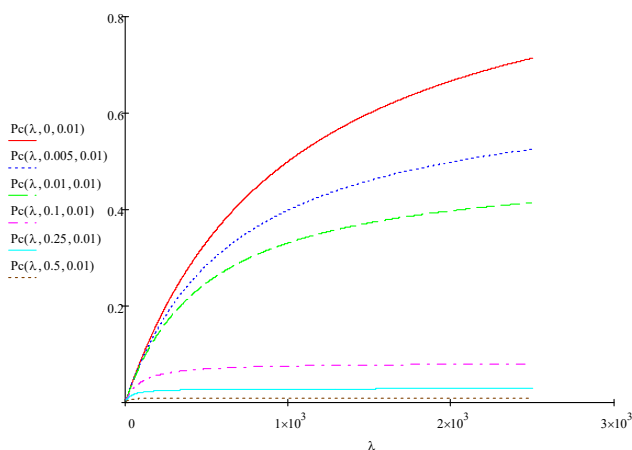


Рис. 3. Графики зависимости вероятности потери вызова

Если в программу ввести данные, учитывающие расчетное время ожидания ответа оператора, а также и время пост-вызывной обработки вызова, то при анализе математической модели получим скорректированные формулы расчета вероятности того, что вызов покинул систему после разговора с оператором ( $P_H$ ) и вероятности того, что вызов покинул систему на ранней стадии обработки вызова  $P_{H1}$ :

$$P_{H1} = \frac{\omega_1}{\omega_{\Pi}} \quad (4)$$

$$P_H = \frac{\omega_0 \lambda}{\omega_0 (\omega_1 + \lambda)}$$

$$(5) \left. \begin{aligned} P_{H1} &= \omega_1 / \omega_{\Pi'} \\ P_H &= \frac{\omega_0 \lambda}{\omega_0 (\omega_1 + \lambda)} \end{aligned} \right\}$$

В результате программной обработки полученных результатов построены графики зависимости (рис. 4) указанных вероятностей от  $W = \omega_0 + \omega_1$ , где  $\omega_0$  – вероятность того, что вызов находится в очереди на обслуживание;  $\omega_1$  – вероятность потери вызова из-за занятости оператора или «нетерпеливости» абонента.

Полученные графики дают возможность оценить производительность ЦОВ в зависимости от статистических данных системы мониторинга и управления, т.е. решать стратегические задачи, например, целесообразности увеличения (уменьшения) числа операторов первого либо второго уровня квалификации.

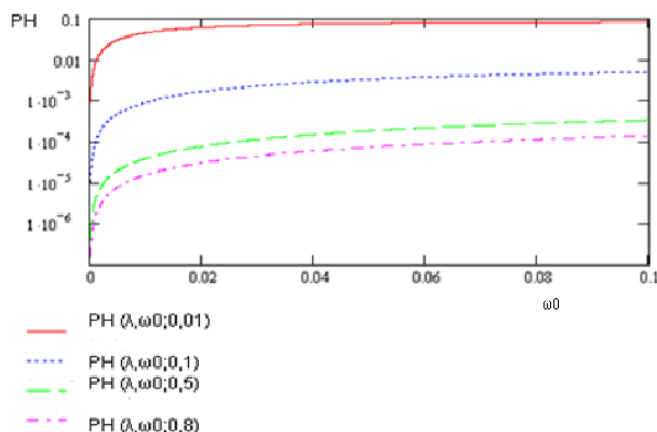


Рис. 4. Графики зависимости вероятности отказа

Учитывая, что при выполнении исследования в программу был введен прогностический метод маршрутизации, формулы были последовательно скорректированы:

- вызов покинул систему после разговора с оператором  $P_H$ , отработанный вызов;
- вызов обслуживался оператором первого уровня с наименьшим значением расчетного времени ожидания  $P_{H1}$ ;
- вызов обслуживался оператором второго уровня при условии, что расчетное и прогнозируемое время не превышает установленного для них порогового значения  $P_{H2}$ ;
- вызов находится в состоянии заверченного обслуживания при условии, что величина расчетного и прогностического времени ожидания, а также коэффициента уровня обслуживания (Service Objective, SO) не превышает порогового значения  $P_{H3}$ .

Расчетные формулы:

$$P_H = \frac{\lambda(\omega_0(1-\beta))}{(\omega_1 + \lambda(1-\beta))(\omega_0 + \omega_1 + \alpha\lambda)} \quad (6)$$

$$P_{H1} = \frac{\omega_1}{(\omega_0 + \omega_1 + \alpha\lambda)} \quad (7)$$

$$P_{H2} = \frac{\omega_1 \omega_0}{(\omega_1 + \lambda(1-\beta))(\omega_0 + \omega_1 + \alpha\lambda)} \quad (8)$$

$$P_{H3} = \frac{\alpha\lambda}{(\omega_0 + \omega_1 + \alpha\lambda)} \quad (9)$$

Для того, чтобы результаты расчетов были более наглядны при их трансформации в графическое изображение введены параметры  $\tau_\lambda = \frac{\lambda}{\omega_0 + \omega_1}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ .  $\tau_\lambda$   $\alpha$  – вероятность того, что абонент не удовлетворен обслуживанием,  $\beta$  – вероятность того, что абонент не удовлетворен ответом оператора второго уровня. Параметр  $\tau_\lambda$  введен для того, чтобы получить зависимости указанных вероятностей непосредственно от отработанных вызовов (успешное обслуживание) без учета вызовов, не получивших ответ оператора из-за превышения времени ожидания ответа, нетерпеливости абонента или неудовлетворенности ответом.

Проводя анализ на основе полученных результатов, можно делать выводы о качестве производительности ЦОВ в части времени нахождения вызова в очереди на обслуживание к операторам первого и второго уровня отдельно, учесть «желаемое время ответа» и произвести расчет коэффициента уровня обслуживания (SO). Таким образом выполнить сегментацию абонентов с целью повышения уровня обслуживания на основе статистических данных системы мониторинга производительности ЦОВ.

### Заключение

Разработанная программа имитационного моделирования позволяет проводить исследования математических моделей, соответствующих алгоритмам функционирования РЦОВ с точки зрения оценки его производительности и с учетом информации о загруженности сетевых ресурсов.

Также программа учитывает информацию о наличии, возможностях и состоянии отдельных внутрисистемных алгоритмических элементов с учетом особенностей функционирования ЦОВ и варьирования возможностями оперативного вмешательства в работу операторского центра в режиме реального времени.

Результаты моделирования показывают, что в часы пиковой нагрузки время ожидания ответа оператора, рассчитанное с учетом всех введенных и ранее не задействованных параметров производительности РЦОВ, сокращается в четыре раза по сравнению с данными модели M/M/N, в три раза по сравнению с моделью M/M/N +M и в два раза по сравнению с моделью M/G/N. В то же время наблюдается повышение коэффициента использования операторов максимально на 10% в часы пиковой нагрузки, а в часы наименьшей нагрузки на 10% понижается по сравнению с моделями M/M/N и M/G/N и незначительно превышает (3%) коэффициент использования операторов для модели M/M/N +M. При этом значения вероятности потерь практически не изменяются и совпадают со значениями, рассчитанными по моделям M/M/N и M/M/N+M, но в обоих случаях не зависят от интенсивности поступления повторных вызовов. Установление выявленных зависимостей стало возможным благодаря вводу в математические модели и алгоритмы обработки вызовов параметра времени ожидания ответа в точке входа в систему, делению процесса обслуживания вызова на независимые события, а также учет повторных вызовов на уровне точки входа в систему и в процессе обслуживания при передаче вызова с одного операторского уровня на другой.

### Литература

1. *Шукаев Д.Н.* Прикладные методы оптимизации: учебник. М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2017. 212с.
2. *Карташевский И.В., Волков А.Н., Киричек Р.В.* Анализ среднего времени задержки в системе массового обслуживания при обработке коррелированного трафика // *Электросвязь*, 2019. №3. С. 41-50.
3. *Шерстнева А.А.* Применение регрессионного анализа в задачах теории телетрафика. //Т-Сопн: Телекоммуникации и транспорт, 2020. Т.14. №12. С. 18-25.
4. РД 45.191-2001 Руководящий документ отрасли. Центры обслуживания вызовов. Общие технические требования. Москва, 2001. 37 с.
5. ГОСТ Р 55540-2013 Качество услуги «Услуга центра обработки вызовов». Показатели качества. М.: Стандартинформ, 2014. 7 с.