

С.В. ДВОРНИКОВ, А.А. МАСЛОВА, Д.В. ВАСИЛЬЕВА
**ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ
СОСТАВНЫХ РАДИОЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ ВИДЕО
В УСЛОВИЯХ ВЗАИМНЫХ ПОМЕХ**

Дворников С.В., Маслова А.А., Васильева Д.В. **Вероятностная оценка помехозащищенности составных радиолиний передачи видео в условиях взаимных помех.**

Аннотация. Переход к автоматизированным системам регулирования на неохраемых железнодорожных переездах обусловил необходимость решения вопросов их безопасности. Наиболее рациональным решением указанной проблемы является применение систем видеонаблюдения, обеспечивающих трансляцию изображений, как на железнодорожные станции, в зоне ответственности которых находятся железнодорожные переезды, так и на локомотивы подвижных составов. С этой целью активно используют системы передачи информации, организованные на основе сетей широкополосного доступа и LTE. Но поскольку работа таких сетей организуется вдоль железнодорожных путей, в том числе в условиях активного применения различных излучающих средств, то для них характерно является нарушение условий электромагнитной совместимости, приводящее к сбою работы в результате непреднамеренного блокирования отдельных каналов. Поэтому анализ условий, при которых наступает сбой работы сети передачи видео, а также прогнозный расчет параметров радиолиний, при которых обеспечивается заданный уровень устойчивости работы сети, является актуальными. Рассмотрены технологии и особенности работы сетей стандарта LTE. Обоснованы показатели и критерии оценки функционирования линий передачи видео в рамках технических возможностей стандарта. Проведена математическая постановка задачи исследования. Определены исходные данные для разработки аналитической модели вероятностной оценки функционирования сети передачи видео. Разработан аналитический аппарат расчета вероятности блокирования каналов, учитывающий взаимную интенсивность использования частотного трафика конфликтующими средствами. Проанализированы требования ГОСТ Р 53111-2008, определяющего условия, при которых обеспечивается устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Получено выражение вероятностной оценки, характеризующее вероятность нарушения (блокирования) работы сети, определяемой как канальными шумами и замираниями, так и помехами непреднамеренного характера от сторонних источников радиоизлучений при нарушении условий их электромагнитной совместимости. Представлены результаты аналитического моделирования, раскрывающие условия, при которых обеспечивается успешное функционирование сети передачи результатов видеонаблюдения. Обосновано, что работа сетей передачи видео в условиях взаимных помех при нарушении требований по электромагнитной совместимости, более чувствительна к изменению отношения значений интенсивностей потоков сети и источников сторонних излучений, работающих в режиме с программной перестройкой рабочей частоты, чем к энергетическим соотношениям полезного и мешающего сигналов.

Ключевые слова: взаимные помехи, системы передачи видео, сети LTE, вероятность блокирования работы сети, помехозащищенность радиолиний.

1. Введение. Переход к автоматизированным системам регулирования на неохраемых железнодорожных переездах

обусловил необходимость решения вопросов их безопасности [1, 2]. В таких условиях наиболее рациональным решением видится применение систем видеонаблюдения с трансляцией изображений [3], как на железнодорожные станции, в зоне ответственности которых находятся железнодорожные переезды, так и на локомотивы подвижных составов. С этой целью активно используют системы передачи информации, организованные на основе сетей широкополосного доступа и LTE (англ.: *Long-Term Evolution*) [4, 5].

Учитывая уровень ответственности, возлагаемый на охранные системы видеонаблюдения, к ним предъявляются достаточно жесткие требования по своевременности и достоверности предоставляемой информации. Но поскольку работа таких сетей организуется вдоль железнодорожных путей, над которыми протянуты высоковольтные провода, то в таких условиях неизбежно возникнут непреднамеренные помехи, обусловленные сложной электромагнитной обстановкой, которая усугубится наличием подвижного состава, как правило, состоящего из металлических вагонов.

Таким образом, работа сетей передачи информации от систем видеонаблюдения, будет проходить в сложной сигнально-помеховой обстановке, характеризуемой наличием, как взаимных помех [6], так и помех, обусловленных спецификой распространения радиоволн диапазона частот работы сетей широкополосного доступа и LTE [7]. В таких условиях велика вероятность того, что назначенный канал может оказаться непригодным для работы, поэтому прагматичным решением видится использования режима с программной перестройкой рабочей частоты (англ.: *Frequency-Hopping Spread Spectrum – FHSS*) [8], аналогично тому, как это реализовано в сетях GSM (англ.: *Global System for Mobile Communications*). Оценке обоснованности такого выбора посвящена настоящая работа. В статье рассмотрены условия, при которых наступает сбой работы сети передачи видео, а также рассчитаны параметры радиолиний, при которых обеспечивается заданный уровень устойчивости работы сети.

При этом в качестве исследуемой конфигурации сетей передачи видео рассмотрена система, состоящая из камеры установленной переезде, подключенной к видеотерминалу, расположенному в кабине локомотива посредством составной радиолинии.

2. Общая постановка задачи и обоснование показателей оценки эффективности. Удобство выбора сетей стандарта LTE для организации передачи видеоинформации, в первую очередь, обусловлено их доступностью для применения, а также наличием широкого ассортимента соответствующего оборудования. Поскольку в

основе большинства оборудования LTE лежит SDR (англ.: *Software-Defined Radio*) платформа [9, 10], то открывается возможность для корпоративных сетей осуществлять индивидуальные настройки, в частности, организовывать режим FHSS [11].

В указанном режиме за счет псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) минимизируется вероятность долговременного выбора непригодного канала, что позволяет повысить общую доступность частотного ресурса для большего числа абонентов, по отношению к режиму жесткого закрепления каналов. Если при этом обеспечить скорость перестройки FHSS такой, что при совместном выборе рабочей частоты различными абонентами не будет происходить взаимное нарушение их работы, то такое решение можно считать обоснованным [12].

Следует отметить, что в США разрешено использование систем FHSS в нелицензионных диапазонах частот 902–928 МГц, 2400–2483,5 МГц и 5725–5850 МГц [13]. При этом в системах FHSS допускается применение передач с излучаемой мощностью в 1 Вт, в то время как для систем без расширенного спектра, значение мощности излучения ограничено 1 мВт.

Прагматичность реализации режима FHSS определяется широкими возможностями по организации одновременной работы большого числа абонентов в ограниченном частотном диапазоне. Так, например, в технологии eXRS (англ.: *eXtreme Radio Service*) при реализации режима FHSS используется 50 рабочих частот из 700 возможных [14, 15]. Но даже такая организация позволяет формировать частотный план на основе порядка десяти миллиардов частотно-временных матриц, определяющих сеансовый алгоритм работы абонентов в режиме FHSS. Указанный выбор минимизирует вероятность случайного совпадения частотного плана для двух групп независимых пользователей, что открывает возможность одновременной работы большого числа сетей в ограниченном диапазоне частот [16]. Как уже отмечалось, важным аспектом реализации режима FHSS является возможность минимизации потери информации при наличии каналов с многолучевым распространением в разрешенном списке рабочих частот.

Данный подход успешно использован в стандарте Bluetooth (адаптации на английский язык датского слова «Blåtand»), (англ.: *Wireless Personal Area Network – WPAN*) [17]. В указанном стандарте диапазон частот разбивается на 79 рабочих каналов, перестройка в пределах которых осуществляется со скоростью 1600 раз в секунду. При этом на длительности такого скачка передается один пакет

данных. Кроме того, режим FHSS реализован и в сетях стандарта GSM, где он определен как *slow frequency hopping* [18]. В указанном режиме связь между мобильным устройством и базовой станцией осуществляется пакетами данных в пределах выделенного временного интервала. Каждый пакет данных имеет длительность около 577 мкс. Тогда при длительности кадра $T_{\text{кад}} = 4,615$ мс, скорость перестройки рабочей частоты для стандарта GSM составляет $V_{\text{FHSS}} = 1 / T_{\text{кад}} = 217$ скачков в секунду (1/с).

Вместе с тем, анализ работ [11, 12, 16, 19] показал, что даже применение режима FHSS, полностью не исключает проблем с обеспечением электромагнитной совместимости (ЭМС) при совместной работе радиоэлектронных средств (РЭС) различных сетей, совместно использующих один и тот же диапазон рабочих частот.

Поэтому вопросы оценки эффективности режима FHSS при организации работы сетей LTE при передаче изображений с систем видеонаблюдения, установленных на не охраняемых железнодорожных переездах, требует дополнительного исследования.

При этом следует отметить, что LTE использует режим FHSS только для восходящей линии связи. Учитывая, что в данном стандарте минимальная длительность информационной посылки определяется длительностью слота, которая для стандарта LTE составляет 0,5 мс, то скорость перестройки выбора рабочих частот будет составлять $V_{\text{FHSS}} = 2000$ 1/с [20].

В основу оценки эффективности функционирования системы связи стандарта LTE, используемую для передачи изображения от камер видеонаблюдения, были положены общие положения теории систем [4]. При этом в качестве показателей определены достоверность, безопасность и своевременность передачи данных видеоизображения [21]. При этом в качестве показателя по своевременности определен временной интервал необходимый для передачи сообщений заданного объема [22], с учетом времени реакции машиниста и тормозного пути подвижного состава. Конкретное значение зависит от категории скорости подвижного состава [2].

Поскольку для формирования видеоизображений используются цифровые видеокамеры, то для оценки достоверности связи целесообразно определить показатели, используемые при оценке качества дискретных видов передач. Например, такой показатель как вероятность битовой ошибки P_b , или вероятность ошибки приема элемента сигнала $P_{\text{ош}}$ или битовой ошибки [23]. В этом случае критерием достоверности следует рассматривать величину допустимой вероятности ошибки $P_{\text{ош доп}}$ с учетом вида модуляции и

используемых мер по обеспечению заданной помехоустойчивости приема (помехоустойчивое кодирование, различные методы разнесенного приема, перемежение и т.д.) [11].

Требования по безопасности связи, как правило, определяются на уровне вторичных сетей. На практике они могут ограничиваться процедурами технического маскирования и разграниченного доступа. На данном этапе их целесообразно вывести в рамки ограничений.

С учетом введенных допущений и ограничений, определим способность сети передачи видеоизображения обеспечивать выполнение предъявляемых к ней требований по достоверности и своевременности, как ее эффективность Q , которую предлагается оценивать по следующим показателям:

– достоверности передачи с вероятностью ошибки не выше допустимой $P(P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}})$;

– и своевременности передачи, т.е. вероятности того, что время, затраченное на передачу видеоизображения, не превысит допустимого значения $P(T_{\text{пер}} \leq T_{\text{пер доп}})$ при условии выполнения требований по достоверности.

Поскольку рассматриваемые значения вероятностей $P(P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}})$ и $P(T_{\text{пер}} \leq T_{\text{пер доп}})$ определяются характеристиками радиоканала, то и эффективность такой сети также предлагается рассматривать с позиций выполнения указанных требований.

Тогда математическую задачу сформулируем следующей редакцией

$$Q \rightarrow \min_{T_{\text{пер}} \leq T_{\text{пер доп}}} \max_{P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}}} Q(P(T_{\text{пер}} \leq T_{\text{пер доп}}), P(P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}})). \quad (1)$$

Учитывая, что теоретический предел дальности связи для скорости в 1 Мбит/с для диапазона 2600 МГц составляет 3,2 км, то для обеспечения требований по своевременности и достоверности передачи видеоизображения в сети LTE, необходимо создавать составную линию радиосвязи.

Поэтому, в интересах решения задачи необходимо разработать модель функционирования сети в режиме FHSS, состоящей из составных линий радиосвязи, с учетом возможных замираний в канале, обусловленных многолучевым характером распространения радиоволн и взаимных помех, обусловленных совпадением выбора рабочих частот при реализации режима FHSS сторонних РЭС.

В качестве основных ограничений будем полагать следующее:

1. Разрабатываемая модель не связана со спецификой сжатия видеоданных.

2. В модели не рассматриваются форматы конкретных кодеков.

3. Архитектура составной линии радиосвязи стандарта LTE на железнодорожном переезде. Для реализации составной линии радиосвязи, спецификация стандарта LTE предлагает ряд вариантов.

В первую очередь, следует обратить внимание на то, что, в части радиодоступа (подсистема E-UTRAN, англ.: *Evolved Universal Terrestrial Access Network*), сеть беспроводной связи стандарта LTE предполагает однородную и неоднородную архитектуру.

Основу однородной архитектуры сети составляют множество макросот, обладающих одинаковым радиусом покрытия территорий и имеющих одинаковую мощность базовых станций. Такая сеть, как правило, используется для организации связи в крупных населенных пунктах. В свою очередь, неоднородная архитектура сети макросот представляет собой совокупность маломощных радиостанций, выполняющих либо функции ретрансляционного оборудования, либо самостоятельной базовой станции малого, по сравнению с покрытием макросоты, радиуса действия.

Реализация неоднородной архитектуры предусматривает выбор оптимального с точки зрения требований, предъявляемых к сети, и условий ее функционирования элементов. Такими элементами являются фемтосоты (англ.: Home eNB), транзитные узлы (англ.: *Relay Node – RN*) или удаленные радиоголовки (англ.: *Remote Radio Head – RRH*). Каждый из этих элементов предполагает использование различных протоколов взаимодействия с ядром пакетной сети и пользовательским оборудованием. Применение фемтосот характерно для покрытия зон доступа внутри зданий с большим числом потенциальных абонентов. Они применяются с целью снижения нагрузки на макросоту. Наиболее интересными, в контексте данного исследования, являются транзитные узлы и удаленные радиоголовки, различие между которыми отражено в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики элементов неоднородной архитектуры E-UTRAN

Параметр	Транзитный узел	Удаленная радиоголовка
Тип присоединения к макросоте	Радиоинтерфейс	Волоконно-оптическая сеть связи
Отображение с точки зрения макросоты	Как пользовательское оборудование	Как составная часть базовой станции
Архитектура управления сетью	Децентрализованное	Централизованное

Ключевой особенностью железнодорожного транспорта является его территориальная протяженность, вдоль которой на большей части, находится малонаселенная или даже не заселенная местность, не имеющая инфраструктуры, позволяющей обеспечить непрерывное техническое обслуживание оборудования и прокладку множества кабелей связи.

Именно большие расстояния и слабо развитая инфраструктура, а также участки местности с различными климатическими условиями настаивают на выбор беспроводной архитектуры сети передачи данных и голосового трафика. С учетом указанных обстоятельств, на железнодорожных переездах, для организации радиолинии предлагается использовать транзитные узлы.

Взаимодействие с транзитным узлом, в общем виде, представляется как первичная обработка пакета данных от пользовательского оборудования транзитным узлом (транзитный узел отображается как базовая станция), и последующая передача его на базовую сеть для обработки (транзитный узел отображается как пользовательское оборудование). Такое техническое решение посредством радиодоступа абонентских терминалов к сети LTE предложено в патенте RU(11) № 2 496 263, опубликованного 20.10.2013. Бюл. № 29 МПК H04W 36/02 (2009.01).

В указанном техническом решении для организации передачи видеотрансляции в кабину локомотива подвижного состава введен мобильный терминал. Структура такой сети радиопередачи с применением транзитных узлов отражена на рисунке 1.

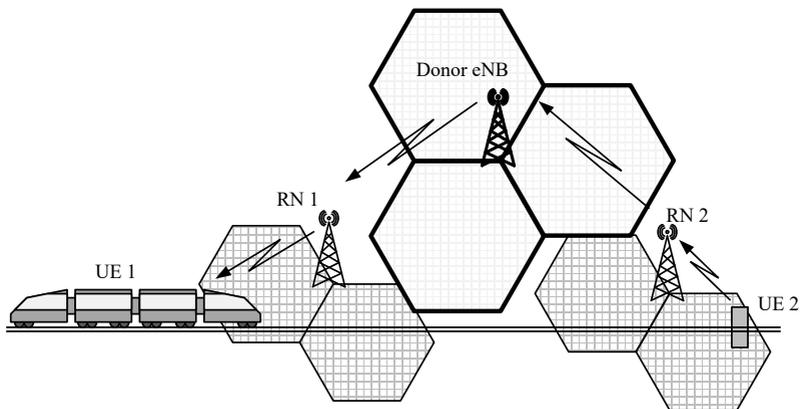


Рис. 1. Реализация сети передачи видеотрансляции в кабину локомотива подвижного состава с железнодорожного переезда посредством транзитного узла

На рисунке 1 условными обозначениями представлены следующие элементы: UE 1 – абонентский терминал, представляющий собой приемо-передатчик стандарта LTE размещенный в кабине локомотива подвижного состава; UE 2 абонентский терминал, представляющий собой приемо-передатчик стандарта LTE размещенный на неохраняемом железнодорожном переезде, получающий данные от видеокамер; RN 1, 2 – транзитные узлы, в зоне действия которых находятся подвижной состав и железнодорожный переезд соответственно; Donor eNB – базовая станция с функцией взаимодействия с транзитными узлами (донорская).

Еще одним вариантом построения сети беспроводной передачи видеоданных с железнодорожного переезда на монитор, размещенный в кабине машиниста локомотива подвижного состава, является использование отдельных элементов ретрансляторов LTE.

Проведенный анализ показал, что как отечественная, так и зарубежная научная общественность не уделяет этому варианту такого обширного внимания, как вышеупомянутым видам архитектуры неоднородной сети LTE. Однако это направление является не менее перспективным для его внедрения на железнодорожном транспорте.

К основным причинам недостаточного внимания к этому направлению следует отнести то, что архитектуре сети E-UTRAN с применением транзитных узлов присущ недостаток, связанный с необходимостью использования специализированной базовой станции, в которую должна быть включена функция взаимодействия с транзитными узлами. Следовательно, для участков железной дороги уже использующих сети 4G LTE, построенных без учета указанной возможности, дополнительное развертывание транзитных узлов не имеет смысла.

Таким образом, для обеспечения дополнительного видеоконтроля критически важных объектов железной дороги, расположенных на ее неохраняемых участках, необходим поиск альтернативных путей решения проблемы, обусловленной недостаточной дальностью зон обслуживания типовых базовых станций стандарта 4G LTE.

Широкое применение ретрансляционные узлы (англ.: *Power Amplifier* – PA) нашли в сетях коммерческой связи, как простое решение, обеспечивающее доступ в сеть Интернет на объектах, расположенных на значительном удалении от базовых станций сотовых операторов. При этом данное решение не требует специальных функций, в отличие от вышеописанного варианта, так

как логическое взаимодействие между ретрансляторами и базовыми станциями сведено к минимуму.

Суть ретрансляции заключается в приеме ослабленного сигнала от базовой станции, усилении его по мощности и передаче либо к пользовательскому терминалу, либо к следующему ретранслятору в цепи. Усиление по мощности сигнала, с одной стороны, повышает вероятность гарантированной доставки данных, но, с другой, вместе с сигналом усиливается и шум. Эта проблема дополнительно актуализирует и настоящее исследование.

Схема с ретрансляторами LTE в системе видеонаблюдения на железнодорожном переезде представлена на рисунке 2.

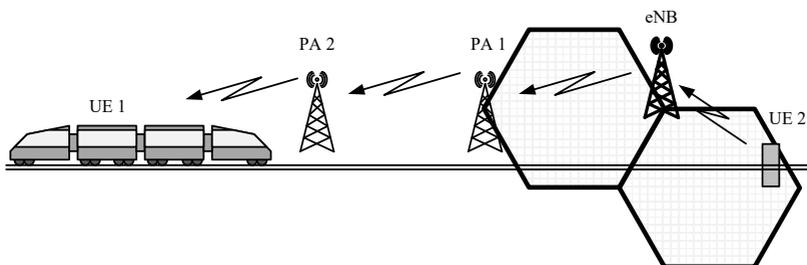


Рис. 2. Реализация сети передачи видеотрансляции в кабину локомотива подвижного состава с железнодорожного переезда посредством ретрансляторов

На рисунке 2 условными обозначениями представлены следующие элементы: PA 1, PA 2, – последовательная цепь ретрансляторов; eNB – базовая станция.

В случае, если внешние воздействия на канал связи будут создавать повышенные шумы, то может быть предложена комбинированная схема, с транзитным узлом, как одним из звеньев в цепи.

Таким образом, зная сигнально-помеховую обстановку на железнодорожном переезде, у проектировщиков есть несколько альтернативных путей построения сети беспроводной связи.

Первая схема актуальна для вновь развертываемой сети LTE. В этом случае, заранее выбирается тип базовой станции, в зависимости от предполагаемой архитектуры сети.

Вторая схема позволяет модернизировать уже существующую сеть связи, и не требует капитального перестроения существующей архитектуры сети.

Как было замечено ранее, помимо вышеописанных систем, спецификация стандарта предполагает еще один вариант построения сети – посредством удаленных радиоголовок.

Работы по этой тематике, как правило, ориентированы на архитектуру сетей пятого поколения. Это объясняется тем, что, несмотря на повышенную емкость сети 5G, ее базовые станции не обеспечивают и половины дальности связи, которая предусмотрена в сетях на базе стандарта 4G. Очевидно, что потенциал системы 5G и системы LTE-Advanced-PRO может быть реализован именно по такой структуре.

Как уже отмечалось, для железной дороги на протяженных участках и перегонах, в сложных погодных условиях и пересеченной местности, вариант построения беспроводной сети связи более экономичен. Однако на крупных сортировочных станциях и узлах, где остро стоит необходимость усовершенствования технических процессов, архитектура сети с использованием удаленных радиоголовок достойна повышенного внимания, в том числе и в составе составной радиолинии.

На первый взгляд такая техническая сложность в перспективе оправдывает себя, особенно если вопрос касается повышения безопасности на железнодорожном транспорте в условиях внедрения все более и более высокоскоростных подвижных составов. Схема применения архитектуры сети с удаленными радиоголовками представлена на рисунке 3.

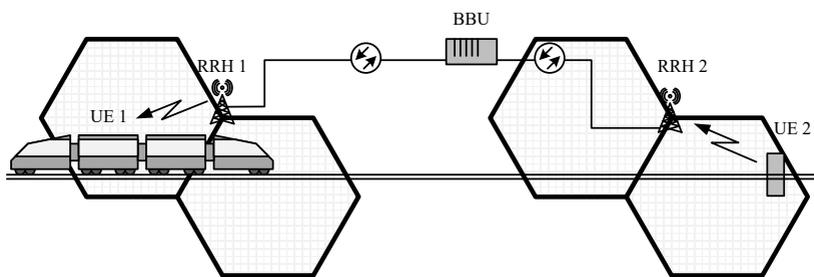


Рис. 3. Архитектура системы видеонаблюдения на железнодорожном переезде посредством внедрения удаленных радиоголовок

На рисунке 3 условными обозначениями показаны удаленные радиоголовки RRH 1 (Remote Radio Head) и RRH 2 в пределах приближения подвижного состава на расстояние не менее двойной максимальной длины тормозного пути при экстренном торможении и

зоне размещения железнодорожного переезда соответственно, и ВВУ (Base Band Unit) – блока базовой полосы.

Таким образом, по результатам анализа различных вариантов построения сети беспроводной связи, можно сделать вывод о том, что возможности сетей стандарта LTE позволяют организовать систему видеотрансляции на железнодорожных переездах в любом регионе и при любых уже существующих архитектурах сети. Но в любом случае выбор варианта сети должен быть обоснован, в том числе с учетом возможных радиоэлектронных конфликтов с уже развернутым оборудованием, в том числе и LTE. В интересах других ведомств.

4. Разработка аналитической модели вероятностной оценки функционирования сети передачи изображений от систем видеонаблюдения. С учетом ограниченной дальности связи для передач диапазона 2600 МГц, искомую модель сети передачи информации от систем видеонаблюдения предлагается разрабатывать в виде составной линии радиосвязи. При этом особый акцент в разрабатываемой модели будет сделан на учет излучений сторонних источников (ИСИ) в восходящих линиях связи, работающих в режиме FHSS со скоростью $V_{\text{FHSS}} = 2000$ 1/с, и приводящих к ухудшению условий ЭМС, снижающих эффективность функционирования сети передачи изображения.

В качестве основы для разработки модели предлагается использовать результаты, полученные авторами в [24].

При обосновании исходных данных будем полагать, что искомая сеть также работает в режиме FHSS с аналогичной скоростью для минимизации вероятности долговременного назначения канала с многолучевым распространением радиоволн.

Таким образом, в качестве негативных факторов, приводящих к блокированию частотных каналов сети передачи изображений, будут выступать ИСИ и замириания в многолучевых каналах.

Тогда с позиций независимости источников деструктивных воздействий [25], вероятность блокирования каналов сети передачи информации, наступающей от систем видеонаблюдения, будет определяться следующим выражением

$$P_{\text{бл}} = P_3 + P_{\text{вп}} - P_3 \cdot P_{\text{вп}}, \quad (2)$$

где P_3 – вероятность блокирования, обусловленная замирианиями и шумами в канале; $P_{\text{вп}}$ – вероятность блокирования канала, обусловленная помехами ИСИ при нарушении условий ЭМС.

В свою очередь величина $P_{\text{вп}}$ определяется соотношением рабочих частот n подверженных взаимным помехам к общему числу рабочих каналов m , задействованных при организации режима с FHSS, что позволяет записать:

$$P_{\text{вп}} = n / m . \quad (3)$$

При этом значение n можно учитывать следующим образом:

$$n = \sum_{i=1}^N iP_i ,$$

где N – общее количество радиосредств, совместно использующих группу из m частот, работа которых может привести к проблемам ЭМС; P_i – вероятность одновременной работы на излучение i радиостанций.

Величину P_i рассчитаем как

$$P_i = \frac{C_N^i (\alpha/\mu)^i}{\sum_{j=0}^N C_N^j (\alpha/\mu)^j} . \quad (4)$$

В выражении (4) использованы следующие значения:

λ – параметр, представляющий собой интенсивность заявок, определяемых удельной среднестатистической нагрузкой пользователя в сети;

$\mu = 1/m_{\text{об}}$ – параметр (интенсивность), характеризующий длительность сеанса связи, с использованием одной частоты (одного рабочего канала);

$m_{\text{об}} = \mathbf{M}[T]$ – среднее значение (математическое ожидание) длительности сеанса T ;

j – количество радиостанций, не использующих данную частоту, т.е. $j = N - i$.

С учетом значений, составляющих выражения (4), формулу (3) можно переписать к виду:

$$n = \frac{1}{\rho} \sum_{i=1}^N i C_N^i (\lambda/\mu)^i , \quad (5)$$

где $\rho = \sum_{j=0}^N C_N^j (\lambda/\mu)^j$ – суммарное значение всех возможных комбинаций отношения λ/μ , приходящихся на каждую j -ю радиостанцию.

Далее проведем разложение величины ρ в соответствии с биномом Ньютона [26]:

$$\sum_{j=0}^N C_N^j (\lambda/\mu)^j = (1 + \lambda/\mu)^N. \quad (6)$$

И с учетом выражения (6) перепишем формулу (4) к следующему виду:

$$P_i = C_N^i \frac{(1 + \lambda/\mu)^i}{(1 + \lambda/\mu)^N} = C_N^i \left(\frac{\lambda\mu^{-1}}{1 + \lambda\mu^{-1}} \right)^i \left(\frac{1}{1 + \lambda\mu^{-1}} \right)^{N-i}. \quad (7)$$

Полученное выражение (7) представляет собой распределение Бернулли, которое позволяет получить не только оценку вероятности занятости каждого из рабочих каналов $\lambda\mu^{-1}/(1 + \lambda\mu^{-1})$, при одновременной работе всех радиостанций, использующих рассматриваемый частотный ресурс, но и рассчитать вероятность противоположенного события $1/(1 + \lambda\mu^{-1})$ [27].

Рассмотренный подход позволяет интерпретировать рабочие каналы, подверженные взаимным помехам, как функцию, характеризующую количество радиосредств, одновременно работающих на излучение в одном частотном диапазоне с различной стратегией смены частотных позиций.

В этом случае выражение (3), характеризующее вероятность среднего числа рабочих частот подверженных взаимным помехам, в серии из N проведенных биномиальных испытаний, определяемых выражением (7), можно представить следующим образом [28]:

$$P_{\text{вп}} = \frac{N}{m} \left(\frac{\lambda\mu^{-1}}{1 + \lambda\mu^{-1}} \right), \quad (8)$$

где m – общее число рабочих каналов, используемых в режиме FHSS.

Блокировка канала, определяемая выражением (8), подразумевает собой вероятность того, что на частоте, используемой в режиме FHSS, в момент передачи на ней сигнала будет осуществляться работа ИСИ. При этом отношение N/m можно рассматривать как частоту одновременного выбора рабочей частоты различными источниками.

Однако следует заметить, что одновременное использование рабочей частоты несколькими ИСИ не приводит к однозначному блокированию канала, т.е. нарушению связи. Такое заключение обусловлено тем, что для блокировки канала, мощность сигналов ИСИ, в точке приема должна превышать допустимое значение энергетического соотношения между полезным и мешающим сигналом. Только в этом случае произойдет нарушение связи. Для оценки последствий деструктивных воздействий со стороны ИСИ воспользуемся требованиями, значения вероятности наступления которых $P_{\text{ВДФ}}$ приведены в таблице 2, согласно ГОСТ Р 53111-2008 «Устойчивость функционирования сети связи общего пользования», в котором определены последствия воздействия внешних дестабилизирующих факторов (ВДФ).

Таблица 2. Зависимость вероятности сохранения работоспособности элементов сети электросвязи от ущерба, причиняемого им воздействием ВДФ

Уровень ВДФ	Ущерб сети связи наносимый ВДФ, %	Вероятность сохранения работоспособности сети	Уровень нарушения безопасности сети
Высокий	до 50	0,5	Высокий
Средний	до 30	0,7	Умеренный
Низкий	до 10	0,9	Низкий

Тогда с учетом (8), выражение (2), характеризующее вероятность нарушения (блокирования) работы сети, определяемой помехами ИСИ при нарушении условий ЭМС, с учетом $P_{\text{ВДФ}}$ и примет следующий вид:

$$P_{\text{бл}} = P_3 + P_{\text{ВДФ}} \frac{N}{m} \left(\frac{\lambda \mu^{-1}}{1 + \lambda \mu^{-1}} \right) - P_3 \frac{N}{m} \left(\frac{\lambda \mu^{-1}}{1 + \lambda \mu^{-1}} \right) P_{\text{ВДФ}}. \quad (9)$$

Значение P_3 определяются текущим отношением мощности полезного сигнала к мощности канальных шумов и помех. Поскольку в сети стандарта LTE планируется, то требования к допустимой

вероятности битовой ошибки в канале, определяющие значение $P_{\text{бит}}$, могут быть определены в соответствии с [29] (таблица 3).

Таблица 3. Требования к вероятности битовой ошибки в канале для заданного качества видео контента

Уровень качества изображения	Допустимый диапазон вероятности ошибок
Высокое качество	менее 1×10^{-4}
Хорошее качество	от 1×10^{-4} до 4×10^{-4}
Удовлетворительное качество	от 4×10^{-4} до 8×10^{-4}
Плохое качество	от 8×10^{-4} до 1×10^{-3}
Очень плохое качество	более 1×10^{-3}

Следовательно, учитывая, что изначальная настройка сети обеспечивает высокое качество изображения, то в расчетах будем полагать $P_3 = 1 \times 10^{-5}$. В свою очередь выбор значений $P_{\text{ВДФ}}$ будет осуществляться с учетом требований таблицы 2.

5. Анализ результатов моделирования. Полученное выражение (9) открывает возможности по проведению моделирования, с целью раскрытия допустимых условий, характеризующих успешное функционирование сети передачи результатов видеонаблюдения.

С этой целью построена зависимость $P_{\text{бит}}$ как функции аргумента (λ/μ) при различных значениях $P_{\text{ВДФ}}$, определяемых требованиями таблицы 1, и значениях $N/m = 0,001$ и $N/m = 0,01$ (при ОСШ в канале, обеспечивающем вероятность битовой ошибки $P_3 = 1 \times 10^{-5}$).

Графики приведены на рисунках 4 и 5.

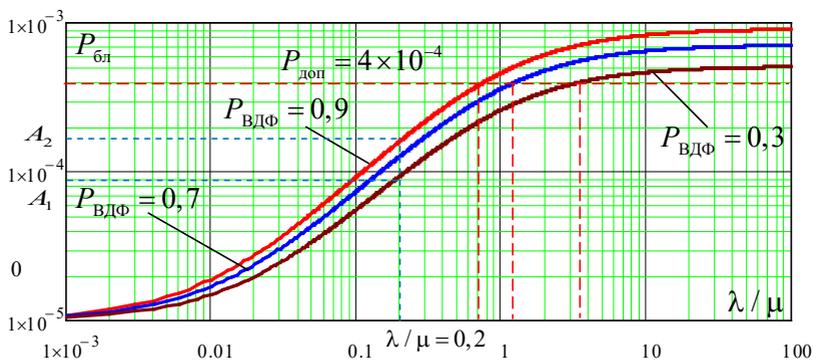


Рис. 4. Зависимость вероятности битовой ошибки в канале от соотношения интенсивностей работы сети, при различных требованиях к качеству передаваемого изображения (при $N/m = 0,001$)

Полученные результаты моделирования позволяют сделать следующее заключение. Величина $P_{\text{ВДФ}}$, несмотря на существенный разброс качественных показателей, определяемых ущербом, наносимым системе связи, вариативность вероятности битовой ошибки весьма незначительна.

В качестве примера, на рисунках 4 и 5 мелким пунктиром показаны значения вероятностей блокирования (точки A_1 и A_2), для отношения значений интенсивностей $\lambda/\mu = 0,2$ при различных величинах вероятности $P_{\text{ВДФ}}$, определяемых уровнем внешних деструктивных факторов.

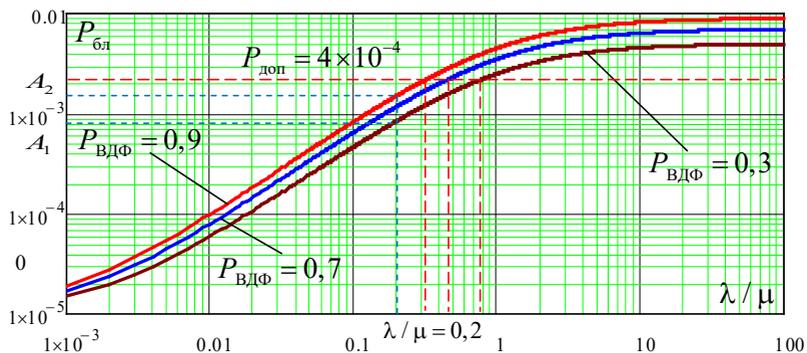


Рис. 5. Зависимость вероятности битовой ошибки в канале от соотношения интенсивностей работы сети, при различных требованиях к качеству передаваемого изображения (при $N/m = 0,01$)

Отметим, что различия $P_{\text{бл}}$ для уровней нарушения безопасности связи от высокого до низкого изменяются в диапазоне от 8×10^{-4} до от 2×10^{-3} . Вместе с тем различия в отношениях интенсивностей λ/μ при уровне $P_{\text{доп}} = 4 \times 10^{-4}$ в тех же условиях (отмечено крупным пунктиром), составляют 2,7 раза (при $N/m = 0,01$) и более чем в 7,1 раза (при $N/m = 0,001$).

Интересным видится зависимость величины $P_{\text{бл}}$ как функции отношения N/m , характеризующей одновременный выбор рабочей частоты (рисунок 6).

Согласно данным, представленным на рисунке 6, допустимая вероятность ошибки в канале, приводящая к блокированию его работы, наступает при отношении N/m порядка 0,001. При этом величина $P_{\text{бл}}$ достаточно слабо зависит от значения вероятности $P_{\text{ВДФ}}$.

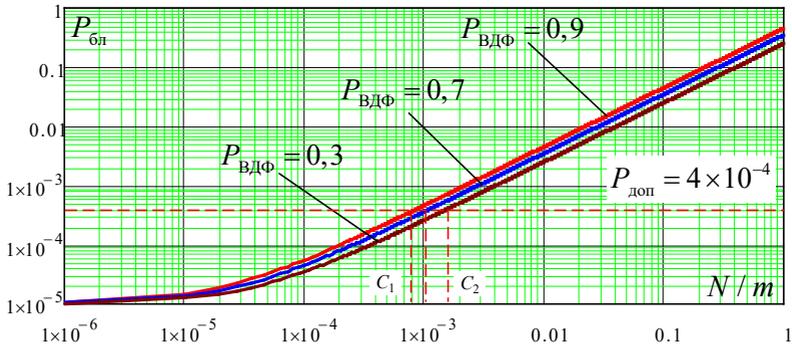


Рис. 6. Зависимость вероятности битовой ошибки в канале от соотношения N/m , при различных требованиях к качеству передаваемого изображения

Следовательно, можно сделать вывод, что работа сетей передачи видео в условиях взаимных помех со стороны ИСИ при нарушении требований по ЭМС, более чувствительна к изменению отношения значений интенсивностей потоков сети и ИСИ, работающих в режиме FHSS, чем к энергетическим соотношениям полезного и мешающего сигналов. Но это при условии, что минимальное значение начинается от допустимого уровня вероятности достоверного приема.

6. Заключение. Полученные результаты исследования работы сетей передачи информации от систем видеонаблюдения показали, что несмотря на применение технологий LTE, обладающих достаточно высокой помехозащищенностью приема, составные линии связи оказались уязвимы к воздействию сигналов сторонних РЭС, выступающих в качестве источников деструктивных воздействий непреднамеренного характера (при условии того, что средняя вероятность одновременного использования канала превысит вероятность 0,001).

При этом проведенные расчеты показали, что наиболее значимым фактором, определяющим помехозащищенность сетей, является соотношение интенсивностей смены частотных позиций конфликтующими сторонами, определяющих занятость рабочего канала. То есть, чем меньше задействуется пораженный канал при организации режима FHSS, тем выше эффективность функционирования сети. Причем фактор, характеризующий пригодность самого канала, не является столь определяющим, как продолжительность времени его использования.

С другой стороны, увеличение скорости смены рабочих каналов в режиме FHSS, ведет к уменьшению энергетического потенциала, и как результат – к уменьшению дистанции связи и возрастанию потребного числа ретрансляторов.

Авторы отмечают, что в проведенном исследовании не рассмотрено влияния скорости движения подвижного состава на характер многолучевого распространения и вероятность блокирования.

Дальнейшее направление исследования авторы связывают с повышением достоверности приема за счет применения методов совместной частотно-временной обработки [30, 31].

Литература

1. Синецкий А.С. Перспективы развития технических средств ЖАТ на перегздах // Автоматика, связь, информатика. 2023. № 11. С. 10–11.
2. Ахмедзянов Г.Г., Дремин В.В., Литвинов А.В. Совершенствование учета параметров объектов железнодорожной инфраструктуры для повышения эффективности эксплуатации железнодорожного перегздного комплекса // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 1. С. 9–13. DOI: 10.17513/snt.39002.
3. Трунаев А.М., Иваницкая И.И. Анализ средств обеспечения безопасности на железнодорожных перегздах // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. 2021. № 63. С. 4–12.
4. Имарова О.Б. Следящая система управления торможением поезда в зоне сближения с неохраняемым и необслуживаемым железнодорожным перегздом // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2020. № 3(79). С. 43–51. DOI: 10.46973/0201-727X_2020_3_43.
5. Лукьянов А.С., Толстых Д. С., Буравцова А.Н. Технологии мобильного широкополосного доступа в сетях LTE и применение в ведомственных структурах // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2019. № 13(1). С. 116–119.
6. Singh U., Dua A., Kumar N., Guizani M. QoS Aware Uplink Scheduling for M2M Communication in LTE/LTE-A Network: A Game Theoretic Approach // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2022. vol. 71. no. 4. pp. 4156–4170. DOI: 10.1109/TVT.2021.3132535.
7. Дворников С. В., Степнин Д. В., Дворников А. С., Букарева А. П. Формирование векторов признаков сигналов из вейвлет-коэффициентов их фреймовых преобразований // Информационные технологии. 2013. № 5. С. 46–49.
8. Фокин Г.А., Волгушев Д.Б. Использование SDR-технологии для задач сетевого позиционирования. Процедуры приема и обработки опорных сигналов LTE // Вестник СибГУТИ. 2023. Т. 17. № 1. С. 52–65. DOI: 10.55648/1998-6920-2023-17-1-52-65.
9. Dvornikov S.S., Zheglov K.D., Dvornikov S.V. SSB signals with controlled pilot level // T-Comm. 2023. vol. 17. no. 3. pp. 41–47. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-3-41-47.
10. Abusalma A. The effect of implementing artificial intelligence on job performance in commercial banks of Jordan // Management Science Letters. 2021. vol. 11. pp. 2061–2070. DOI: 10.5267/j.msl.2021.3.003.

11. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Оценка влияния гауссовского шума, помех гармонического типа и комбинированных помех на беспроводные устройства ближнего радиуса действия // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 9. С. 124–137. DOI: 10.18127/j00338486-202309-11.
12. Алексеев В. Сравнительные характеристики широкополосных и узкополосных сетей LPWAN нелицензируемого диапазона для приложений M2M и IoT // Беспроводные технологии. 2019. № 3(56). С. 10–20.
13. Li J., Li X., Li H., et al. Fabrication of the Cu/AgCuTi/Nb composite for superconducting radio-frequency material under extreme service conditions based on electroplating additive manufacturing // Materials & Design. 2024. vol. 244. pp. 113220. DOI: 10.1016/j.matdes.2024.113220.
14. Flores Soriano M. Solar radio bursts impact on the International GNSS Service Network during Solar Cycle 24 // Journal of Space Weather and Space Climate. 2024. vol. 14. DOI: 10.1051/swsc/2024034.
15. Иванова Д.В., Маркова Е.В., Шоргин С.Я., Гайдамака Ю.В. Модели совместного обслуживания трафика EMBB и URLLC на основе приоритетов в промышленных развертываниях 5G NR // Информатика и ее применения. 2023. Т. 17. № 4. С. 64–70. DOI: 10.14357/19922264230409.
16. Журавлев Д.В., Кузьменко Р.В., Чепелев М.Ю., Минаков Д.С. Разработка и реализация алгоритма анализа сигналов стандарта Bluetooth // Вестник Воронежского института ФСИИ России. 2021. № 3. С. 14–22.
17. Vasilyeva D.V., Dvornikov S.V., Yakushenko S.A.I., Dvornikov S.S. Automation of detection procedures based on the results of processing images from video surveillance systems. Collection of abstracts of reports of the III International Forum “Mathematical methods and models in high-tech production”. 2023. pp. 157–158.
18. Vasilyeva D.V., Dvornikov S.V., Yakushenko S.A., Dvornikov S.S. Automation of forest fire detection procedures based on the results of video processing // Scientific and analytical journal “Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Fighting Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia”. 2024. vol. 2023. no. 4. pp. 47–58. DOI: 10.61260/2218-130X-2024-2023-4-47-58.
19. Дворников С.В., Дворников С.С., Коноплев М.А. Алгоритм распознавания сигналов радиосвязи на основе симметрических матриц. Информационные Технологии. 2010. № 9. С. 75–77.
20. Abbasov I.B. Image Recognition in Agriculture and Landscape Protection // International Journal of Science and Research. 2020. vol. 9. no. 12. pp. 757–763. DOI: 10.21275/SR201212144831.
21. Себекин Г.В., Щурков А.О., Маслов А.А., Андреев Ю.В. Построение мультисервисной платформы спутниковой связи на основе решений для сетей передачи данных стандарта LTE (3GPP) // Успехи современной радиоэлектроники. 2024. № 2. С. 66–75. DOI: 10.18127/j20700784-202402-06.
22. Батенков К.А., Королев А.В., Миронов А.Е. Эффективность использования канального ресурса при объединении и кластеризации передаточных возможностей звена мультисервисной сети связи // Информационные системы и технологии. 2020. № 2(118). С. 101–105.
23. Макаренко С.И. Интероперабельность организационно-технических систем. Санкт-Петербург: Наукаемкие технологии, 2024. 313 с.
24. Дворников С.С., Дворников С.В., Леонов Д.М., Махфуд М.Г. Эффективность функционирования локальных радиосетей в сложной радиоэлектронной обстановке // Информация и космос. 2023. № 1. С. 29–34.
25. Дюк В.А., Малыгин И.Г. Сравнение алгоритмов распознавания типов транспортных средств по параметрам их силуэтов // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4-4(42). С. 197–201.

26. Чубарико В.Н. Обобщённая формула бинома Ньютона и формулы суммирования. Чебышевский сборник. 2020. Т. 21. № 4. С. 270–301. DOI: 10.22405/2226-8383-2020-21-4-270-301.
27. Ананьевский С.М., Невзоров В.Б. О некоторых вероятностных распределениях, связанных с классической схемой Бернулли // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2022. Т. 9. № 2. С. 201–208. DOI: 10.21638/spbu01.2022.202.
28. Васильева Д.В., Дворников С.С., Толстуха Ю.Е., Обрезков П.С., Дворников С.В. Формирование Векторов признаков для систем видеонаблюдения // Вопросы Радиоэлектроники. Серия: Техника Телевидения. 2023. № 4. С. 62–68.
29. Шелухин О.И., Ахметшин Р.Р., Руднев А.Н., Иванов Ю.А. Влияние различных типов ошибок в каналах беспроводного доступа на качество систем видеонаблюдения // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2012. № 11. С. 62–66.
30. Sheikh H.R., Bovik A.C. Image information and visual quality // IEEE Transactions on Image Processing. 2006. vol. 15. no. 2. pp. 430–444. DOI: 10.1109/tip.2005.859378.
31. Ключко В.К., Ву Б.Х. Исследование частотно-временной обработки сигналов в системе доплеровских приемников // Цифровая обработка сигналов. 2024. № 4. С. 33–39.

Дворников Сергей Викторович — д-р техн. наук, профессор, кафедра радиотехнических и оптоэлектронных комплексов, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП); профессор, кафедра радиосвязи, Военная академия связи им. С.М. Буденного. Область научных интересов: построение помехозащищенных систем радиосвязи, формирование и обработка сигналов сложных структур. Число научных публикаций — 609. practicsv@yandex.ru; Тихорецкий проспект, 67, 194064, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)247-9400.

Маслова Анна Андреевна — аспирант, кафедра электрическая связь, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». Область научных интересов: разработка, и совершенствование методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций. Число научных публикаций — 10. Bloodyelis@yandex.ru; Московский проспект, 9, 190031, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(909)580-1511.

Васильева Дина Владимировна — аспирант, старший преподаватель, кафедры радиотехнических систем института радиотехники и инфокоммуникационных технологий, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП). Область научных интересов: цифровая обработка сигналов. Число научных публикаций — 45. doli.dina@mail.ru; улица Большая Морская, 67, 190000, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(931)385-9181.

S. DVORNIKOV, A. MASLOVA, D. VASILIEVA
**PROBABILISTIC ESTIMATION OF NOISE IMMUNITY
OF COMPOSITE VIDEO TRANSMISSION RADIO LINES
IN CONDITIONS OF MUTUAL INTERFERENCE**

Dvornikov S., Maslova A., Vasilieva D. Probabilistic Estimation of Noise Immunity of Composite Video Transmission Radio Lines in Conditions of Mutual Interference.

Abstract. The transition to automated regulation systems at unguarded railroad crossings has necessitated the solution of their safety issues. The most rational solution to this problem is the use of video surveillance systems that provide the transmission of images both to the railroad stations, in the area of responsibility of which the railroad crossings are located, and to the locomotives of rolling stock. For this purpose, information transmission systems organized on the basis of broadband and LTE networks are actively used. But since the operation of such networks is organized along the railway tracks, including in conditions of active application of various radiating devices, they are characterized by violation of electromagnetic compatibility conditions, leading to failure of operation as a result of inadvertent blocking of separate channels. Therefore, the analysis of conditions under which the failure of the video transmission network occurs, as well as the predictive calculation of the parameters of radio lines, which provides a given level of stability of the network, is relevant. Technologies and peculiarities of LTE standard networks operation are considered. Indicators and criteria for evaluating the functioning of video transmission lines within the technical capabilities of the standard are substantiated. The mathematical formulation of the research problem is carried out. The initial data for the development of an analytical model of probabilistic assessment of video transmission network functioning are determined. The analytical apparatus for calculating the probability of channel blocking, taking into account the mutual intensity of frequency traffic usage by conflicting devices, is developed. The requirements of GOST R 53111-2008, defining the conditions under which the stability of public communication network operation is ensured, are analyzed. The expression of probabilistic estimation characterizing the probability of disruption (blocking) of network operation determined by both channel noise and fading, and unintentional interference from third-party sources of radio emissions due to violations of electromagnetic compatibility is obtained. The results of analytical modeling are presented, revealing the conditions under which the successful functioning of the video surveillance transmission network is ensured. It is substantiated that the operation of video transmission networks under conditions of mutual interference in violation of electromagnetic compatibility requirements is more sensitive to changes in the ratio of intensity values of network streams and sources of third-party radiations operating in the mode with programmed tuning of the operating frequency than to energy ratios of useful and interfering signals.

Keywords: mutual interference, video transmission systems, LTE networks, probability of network blocking, interference immunity of radio lines.

References

1. Sinetsky A.S. [Prospects for the development of technical means of Railway Automated Traffic Control at crossings]. *Avtomatika, svjaz', informatika – Automation, Communications, Informatics*. 2023. no. 11. pp. 10–11. (In Russ.).
2. Akhmedzyanov G.G., Dremin V.V., Litvinov V.V., Litvinov A.V. [Improvement of the railway infrastructure objects parameters accounting for the railway crossing complex operation efficiency increase]. *Sovremennye naukoemkie tehnologii –*

- Modern Science-Intensive Technologies. 2022. no. 1. pp. 9–13. DOI: 10.17513/snt.39002. (In Russ.).
3. Трунаев А.М., Иванническая И.Л. Analiz sredstv obespechenija bezopasnosti na zheleznodorozhnyh pereezdah [Analysis of the means to ensure safety at the railway crossings]. Sbornik nauchnyh trudov Doneckogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [Collection of scientific papers of Donetsk Institute of Railway Transport]. 2021. no. 63. pp. 4–12. (In Russ.).
 4. Imarova O.B. [Tracking system of train braking control in the zone of approaching an unguarded and unattended railroad crossing]. Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija – Vestnik of Rostov State University of Railway Communication. 2020. no. 3(79). pp. 43–51. DOI: 10.46973/0201-727X_2020_3_43. (In Russ.).
 5. Lukyanov A.S., Tolstykh D.S., Buravtsova A.N. [Technologies of mobile broadband access in LTE networks and application in departmental structures]. Vestnik Voronezhskogo instituta vysokih tehnologij – Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies. 2019. no. 13(1). pp. 116–119. (In Russ.).
 6. Singh U., Dua A., Kumar N., Guizani M. QoS Aware Uplink Scheduling for M2M Communication in LTE/LTE-A Network: A Game Theoretic Approach. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2022. vol. 71. no. 4. pp. 4156–4170. DOI: 10.1109/TVT.2021.3132535.
 7. Dvornikov S.V., Stepynin D.V., Dvornikov A.S., Bukareva A.P. [Formation of signal feature vectors from wavelet coefficients of their frame transformations]. Informacionnye tehnologii – Information Technologies. 2013. no. 5. pp. 46–49. (In Russ.).
 8. Fokin G.A., Volgushev D.B. [Using SDR-technology for network positioning tasks. Procedures of reception and processing of LTE reference signals]. Vestnik SibGUTI – Bulletin of SibGUTI. 2023. vol. 17. no. 1. pp. 52–65. DOI: 10.55648/1998-6920-2023-17-1-52-65. (In Russ.).
 9. Dvornikov S.S., Zheglov K.D., Dvornikov S.V. SSB signals with controlled pilot level. T-Comm. 2023. vol. 17. no. 3. pp. 41–47. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-3-41-47.
 10. Abusalma A. The effect of implementing artificial intelligence on job performance in commercial banks of Jordan. Management Science Letters. 2021. vol. 11. pp. 2061–2070. DOI: 10.5267/j.msl.2021.3.003.
 11. Artyushenko V.M., Volovach V.I. [Evaluation of the influence of the Gaussian noise, harmonic type interference and combined interference on the short-range wireless devices]. Radiotekhnika – Radio engineering. 2023. vol. 87. no. 9. pp. 124–137. DOI: 10.18127/j00338486-202309-11. (In Russ.).
 12. Alekseev V. [Comparative characteristics of broadband and narrowband unlicensed LPWANs for M2M and IoT applications]. Besprovodnye tehnologii – Wireless Technologies. 2019. no. 3(56). pp. 10–20. (In Russ.).
 13. Li J., Li X., Li H., et al. Fabrication of the Cu/AgCuTi/Nb composite for superconducting radio-frequency material under extreme service conditions based on electroplating additive manufacturing. Materials & Design. 2024. vol. 244. pp. 113220. DOI: 10.1016/j.matdes.2024.113220.
 14. Flores Soriano M. Solar radio bursts impact on the International GNSS Service Network during Solar Cycle 24. Journal of Space Weather and Space Climate. 2024. vol. 14. DOI: 10.1051/swsc/2024034.
 15. Ivanova D.V., Markova E.V., Shorgin S.Ya., Gaidamaka Y.V. [Models of EMBB and URLLC traffic co-servicing based on priorities in industrial 5G NR deployments]. Computer science and its applications – Informatics and its applications. 2023. vol. 17. no. 4. pp. 64–70. DOI: 10.14357/19922264230409. (In Russ.).

16. Zhuravlev D.V., Kuzmenko R.V.V., Chepelev M.Yu, Minakov D.S. [Development and implementation of the algorithm for analyzing signals of Bluetooth standard]. Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii – Vestnik Voronezh Institute of FSIN Russia. 2021. no. 3. pp. 14–22. (In Russ.).
17. Vasilyeva D.V., Dvornikov S.V., Yakushenko S.A.I., Dvornikov S.S. Automation of detection procedures based on the results of processing images from video surveillance systems. Collection of abstracts of reports of the III International Forum “Mathematical methods and models in high-tech production”. 2023. pp. 157–158.
18. Vasilyeva D.V., Dvornikov S.V., Yakushenko S.A., Dvornikov S.S. Automation of forest fire detection procedures based on the results of video processing. Scientific and analytical journal “Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Fighting Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia”. 2024. vol. 2023. no. 4. pp. 47–58. DOI: 10.61260/2218-130X-2024-2023-4-47-58.
19. Dvornikov S.V., Dvornikov S.S., Konoplev M.A. [Algorithm of radio communication signals recognition on the basis of symmetric matrices]. Informacionnye Tehnologii – Information technologies. 2010. no. 9. pp. 75–77. (In Russ.).
20. Abbasov I.B. Image Recognition in Agriculture and Landscape Protection. International Journal of Science and Research. 2020. vol. 9. no. 12. pp. 757–763. DOI: 10.21275/SR201212144831.
21. Sebekin G.V., Shchurkov A.O., Maslov A.A., Andreev Yu. V. Building a multiservice platform of satellite communication on the basis of solutions for LTE (3GPP) data networks. Uspehi sovremennoj radioelektroniki – The successes of modern radio electronics. 2024. no. 2. pp. 66–75. DOI: 10.18127/j20700784-202402-06. (In Russ.).
22. Batenkov K.A., Korolev A.V., Mironov A.E. [Efficiency of channel resource utilization at unification and clustering of transmission capabilities of a link of a multiservice communication network]. Informacionnye sistemy i tehnologii – Information systems and technologies. 2020. no. 2(118). pp. 101–105. (In Russ.).
23. Makarenko S.I. Interoperabel'nost' organizacionno-tehnicheskikh sistem [Interoperability of organizational and technical systems]. Sankt-Peterburg: Naukoemkie tehnologii, 2024. 313 p. (In Russ.).
24. Dvornikov S.S., Dvornikov S.V., Leonov D.M., Makhfud M.G. [Efficiency of using local radio networks in a digital radio-electronic system]. Informacija i kosmos – Information and space. 2023. no. 1. pp. 29–34. (In Russ.).
25. Duke V.A., Malygin I.G. [Comparison of algorithms for recognizing vehicle types based on the parameters of their silhouettes]. Morskie intellektual'nye tehnologii – Marine Intelligent Technologies. 2018. no. 4-4(42). pp. 197–201. (In Russ.).
26. Chubariko V.N. [Generalized formula of Newton's binomial and summation formulas]. Chebyshevskij sbornik – Chebyshev Collection. 2020. vol. 21. no. 4. pp. 270–301. DOI: 10.22405/2226-8383-2020-21-4-270-301. (In Russ.).
27. Ananievsky S.M., Nevzorov V.B. [On some probability distributions related to the classical Bernoulli scheme]. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Matematika. Mehanika. Astronomija – Vestnik of St. Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy. 2022. vol. 9. no. 2. pp. 201–208. DOI: 10.21638/spbu01.2022.202. (In Russ.).
28. Vasilyeva D.V., Dvornikov S.S., Tolstukha Yu.E., Obrezkov P.S., Dvornikov S.V. [Formation of feature vectors for video surveillance systems]. Voprosy Radioelektroniki. Serija: Tehnika Televidenija – Radio Electronics issues. Series: Television Technology. 2023. no. 4. pp. 62–68. (In Russ.).
29. Shelukhin O.I., Akhmetshin R.R., Rudnev A.N., Ivanov Yu.A. [Influence of different types of errors in wireless access channels on the quality of video surveillance systems]. T-Comm: Telecommunications and Transportation. 2012. no. 11. pp. 62–66. (In Russ.).

30. Sheikh H.R., Bovik A.C. Image information and visual quality. IEEE Transactions on Image Processing. 2006. vol. 15. no. 2. pp. 430–444. DOI: 10.1109/tip.2005.859378.
31. Klochko V.K., Wu B.H. [Investigation of the frequency-time signal processing in the system of Doppler receivers]. Cifrovaja obrabotka signalov – Digital Signal Processing. 2024. no. 4. pp. 33–39. (In Russ.).

Dvornikov Sergey — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Department of radio engineering and optoelectronic complexes, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation» (SUAI); Professor, Department of radio communications, Military Academy of Communications. Research interests: construction of noise-protected radio communication systems, formation and processing of signals of complex structures. The number of publications — 609. practicsv@yandex.ru; 67, Tikhoretsky Av., 194064, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)247-9400.

Maslova Anna — Postgraduate student, Department of electrical communications, Department of Electrical Communications, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «St. Petersburg State University of Railway Transport of the Emperor Alexander I». Research interests: development and improvement of methods of research, modeling and design of networks, systems and devices of telecommunications. The number of publications — 10. Bloodyelis@yandex.ru; 9, Moskovsky Av., 190031, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(909)580-1511.

Vasylieva Dina — Postgraduate student, senior lecturer, Department of radio engineering systems, institute of radio engineering and info-communication technologies, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation» (SUAI). Research interests: digital signal processing. The number of publications — 45. doli.dina@mail.ru; 67, Bolshaya Morskaya St., 190000, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(931)385-9181.