

УДК 621.391

doi: 10.53816/23061456_2025_1-2_52

**ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ОПТИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ
СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ
НА ФОНЕ НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**
**APPLICATION OF A SPECIAL-PURPOSE OPTICAL TRANSPORT NETWORK
MODEL UNDER UNAUTHORIZED INFLUENCES**

Канд. техн. наук А.П. Бойко¹, канд. техн. наук П.И. Кузин², канд. техн. наук А.А. Шевченко¹

Ph.D. A.P. Boyko, Ph.D. P.I. Kuzin, Ph.D. A.A. Shevchenko

¹*Военная академия связи им. С.М. Буденного,*

²*Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова*

Благодаря переходу на гибкую сетку частот и стремительное развитие технологий коммутации и маршрутизации спектра в оптических сетях, стала доступна новая телекоммуникационная услуга физического уровня — аренда спектра, представляющая собой обобщение и развитие другой услуги — аренды длин волн. Ряд достоинств, связанных с возможностью гибкого управления канальной структурой в условиях изменения требований к пропускной способности направлений связи делает аренду спектра привлекательным решением для построения оптических транспортных сетей специального назначения, однако требует дополнительных исследований возможных рисков, связанных с множественным доступом пользователей к элементам инфраструктуры операторов связи. В статье рассматривается применение разработанной модели на основе нового вида телекоммуникационных услуг, функционирующей в условиях возможных несанкционированных воздействий.

Ключевые слова: оптические транспортные сети специального назначения, аренда спектра, спектральный ресурс, несанкционированные воздействия.

Thanks to transition to flexible frequency grid and rapid development of spectrum switching and routing technologies in optical networks, a new physical layer telecommunication service — spectrum leasing — became available, which is a generalization and development of another service — wavelength leasing. A number of advantages associated with the possibility of flexible channel structure management in the conditions of changing requirements to the bandwidth capacity of communication directions makes spectrum leasing an attractive solution for the construction of optical transport networks for special purposes, but requires additional research of possible risks associated with multiple access of users to the elements of the infrastructure of telecom operators. The article considers the application of the developed model on the basis of a new type of telecommunication services operating under conditions of possible unauthorized impacts.

Keywords: special purpose optical transport networks, spectrum lease, spectrum resource, unauthorized impacts.

Введение

Современные оптические транспортные сети специального назначения (ОТС СН) формируются на основе доверенной активной телекоммуникационной инфраструктуры операторов связи Единой сети электросвязи Российской Федерации (ЕСЭ РФ), представляющей собой выделенные физические линейные ресурсы: оптические кабели, отдельные пары оптических волокон, длины волн [1–4].

Подход к аренде телекоммуникационных ресурсов на физическом уровне имеет ряд достоинств, заключающихся в:

- снижении рисков нарушения безопасности и устойчивости ОТС СН, за счет минимизации использования активного телекоммуникационного оборудования операторов связи ЕСЭ РФ;

- увеличении гибкости и масштабируемости сети за счет возможности изменения пропускной способности каналов и линий в соответствии с изменениями потребностей в скоростях передачи между корреспондирующими узлами сети;

- уменьшении экономических затрат за счет оптимизации арендуемых ресурсов и использования собственного оборудования;

- повышении управляемости за счет доступа к контролю основных (собственных) активных элементов ОТС СН.

Коммерческие операторы и провайдеры связи по всему миру непрерывно совершенствуют виды предоставляемых телекоммуникационных услуг. С развитием технологий эластичных (гибких) оптических сетей [5, 6] появилась новая телекоммуникационная услуга — аренда спектра в оптических сетях, позволяющая арендаторам использовать определенные частотные диапазоны в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) операторов для формирования спектральных каналов на основе собственного, доверенного оборудования [7, 8]. При этом пользователи данной услуги способны варьировать характеристиками и показателями образуемых спектральных каналов: пропускной способностью, качеством передачи, шириной спектра, а также показателями устойчивости и безопасности, в условиях возможных несанкционированных воздействий на физическом уровне.

Несмотря на совершенствование и развитие подходов к использованию арендуемых те-

лекоммуникационных ресурсов сетей связи общего пользования (СС ОП), сети связи специального назначения (СС СН) продолжают критически зависеть от протоколов и технологий, применяемых в гражданской сфере связи и телекоммуникаций. Таким образом, СС ОП будут и впредь играть роль вспомогательного компонента при построении СС СН, а их телекоммуникационные ресурсы будут восполнять недостаток собственных ресурсов, необходимых для построения СС СН. При этом существенное отставание развития СС СН от СС ОП будет способствовать тому, что наиболее ожидаемым сценарием развития СС СН будет являться переход на технологии, применяемые в гражданской сфере связи и телекоммуникаций. Многолетний опыт взаимодействия СС СН с СС ОП показывает, что технологическое превосходство последних будет способствовать тому, что при построении СС СН будут применяться готовые технологии гражданской связи, которые необходимо адаптировать к возможным несанкционированным воздействиям, в особенности преднамеренного характера.

Для проведения исследований и экспериментов с целью получения информации о важнейших свойствах ОТС СН на основе современных телекоммуникационных ресурсов, проектирования, а также эффективного управления ими в условиях несанкционированных воздействий, необходима разработка адекватных, полных и непротиворечивых моделей. Целью данной статьи является разработка и применение модели ОТС СН, сформированной на основе выделенного спектрального ресурса и функционирующей в условиях несанкционированных воздействий. Далее по тексту под ОТС СН будут пониматься ОТС СН, сформированные на основе арендованного (выделенного) спектрального ресурса.

Принципы формирования ОТС СН

Существующие ОТС СН характеризуются, как правило, следующими особенностями:

- формируются на основе гибридных волоконно-оптических трасс, использующих как собственные ВОЛС, так и ВОЛС различных операторов связи;

- используют ВОЛС с различной структурой (с компенсаторами дисперсии и без, с линейными

оптическими усилителями и распределенными волоконными усилителями) и различными типами оптических волокон;

- функционируют в условиях возможных несанкционированных воздействий противника;

- имеют потребность в информационно-технологической совместимости и возможности сопряжения с интеллектуальной сетью связи (ИСС) и сетями связи общего пользования.

Модель перспективной ОТС СН основана на семействе технологий эластичных (гибких) оптических сетей. Как и в существующих оптических сетях, формирование каналов осуществляется на основе технологий спектрального уплотнения в определенной (выделенной) полосе частот ВОЛС. Однако назначение частот и выбор видов передаваемых сигналов осуществляется более «свободно» в соответствии с правилами гибкой сетки частот. Кроме того, коммутация оптических сигналов в узлах сети осуществляется программно и без преобразования сигналов в электрический вид. ОТС СН имеет трехуровневую архитектуру:

- магистральный (глобальный) уровень представляет собой ядро сети и предназначен для передачи (распространения) разнородного трафика между различными региональными ОТС СН;

- региональный (зоновый) уровень агрегации трафика ОТС СН предназначен для распределения трафика между объектами внутри региона и передачи трафика на первый — магистральный уровень;

- местный уровень (сетей доступа) предназначен для обеспечения доступа к узлам связи ОТС СН.

Канальная структура ОТС СН реализуется полностью оптическими соединениями между двумя корреспондирующими узлами, позволяющими передавать оптические сигналы без оптоэлектрооптического (ОЭО) преобразования в транзитных узлах. Образованные отдельными спектральными каналами между двумя соседними узлами, данные оптические соединения являют собой составные оптические каналы и носят название световых путей. Отсутствие ОЭО-преобразования в процессе коммутации, мультиплексирования и ретрансляции оптических сигналов способствует тому, что оптические сети на основе световых путей имеют ряд достоинств: низкую сквозную задержку передачи

данных, дополнительный уровень безопасности, повышенную стабильность оптического и цифрового синхронизма, а самое главное возможность оптимизировать канальную структуру сети под конкретные требования.

Модель ОТС СН на основе выделенного спектрального ресурса

Для того чтобы предлагаемая модель охватывала не только образ конкретной ОТС СН, а целый класс ОТС СН (модель в широком смысле), воспользуемся при разработке модели понятиями, описанными в [11, с. 24].

Класс моделируемых объектов (прототипов, прообразов) представляет собой магистральные и региональные ОТС СН, сформированные на основе выделенного спектрального ресурса, под которым понимаются диапазоны частот в ВОЛС, доступные для передачи оптических сигналов. Архитектура ОТС СН представляется единством физической и протокольной структур. Физическая структура сети определяет вещественную основу организации сети. К элементам физической структуры сети относятся узлы и соединяющие их линии [12]. Узлы представляют собой объединение реконфигурируемых оптических мультиплексоров ввода/вывода (РОМВВ) на основе селективных переключателей длины волны с переменной полосой пропускания и транспондеров (мультиплексоров) с переключаемыми форматами сигналов (рис. 1). В узлах поддерживаются функции коммутации фрагментов спектра линейных групповых сигналов, а также формирование оптических сигналов с переменной скоростью, соответствующей оптической транспортной иерархии, а также шириной спектра и центральной частотой, определенными в рекомендациях Международного союза электросвязи (МСЭ) для гибкой сетки частот.

Линии представляют собой выделенный спектральный ресурс в ВОЛС, поддиапазоны частот, доступные для передачи оптических сигналов между узлами (рис. 2). Поддиапазоны характеризуются количеством элементарных частотных интервалов (ЭЧИ) слотов, значениями нижних и верхних частот.

Протокольная структура ОТС СН представляет собой свод правил взаимодействия между

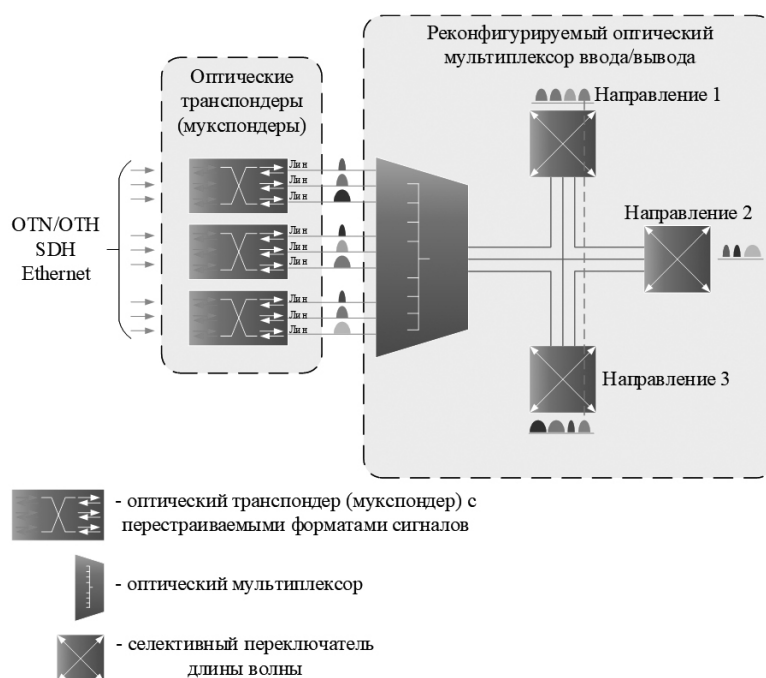


Рис. 1. Структура узла оптической транспортной сети специального назначения

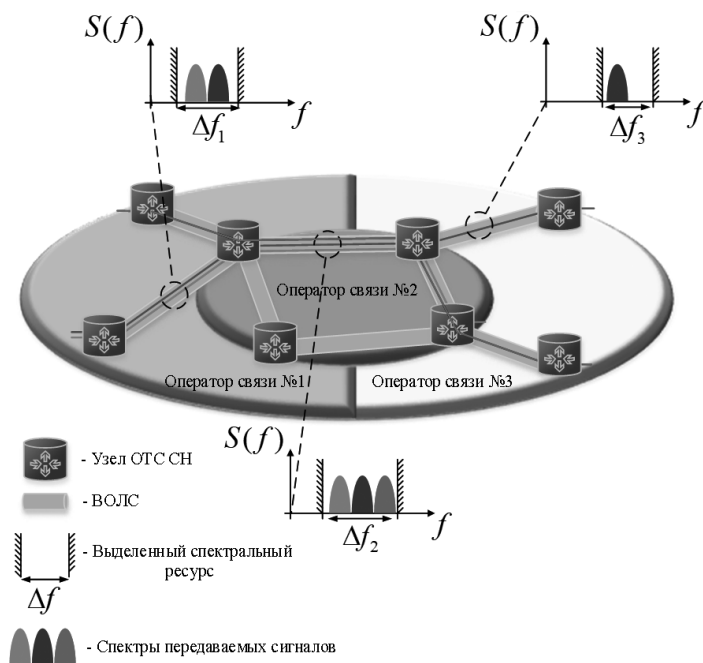


Рис. 2. Выделенный спектральный ресурс в волоконно-оптической линии связи

программными и аппаратными средствами сети и основывается на совокупности применяемых технологий. Аппаратура спектрального уплотнения реализуется на основе технологии плотного мультиплексирования с разделением по длине волны DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Центральные частоты и полосы

пропускания спектральных каналов определяются планом гибкой сетки частот (Flex Grid). Сигналы в оптических транспондерах (мультиплексерах) формируются с использованием известных форматов модуляции (и типов линейного кодирования), скорости передачи соответствуют цифровым групповым сигналам оптической

транспортной иерархии ОТН (Optical Transport Hierarchy).

Класс формальных конструкций, описывающих образы моделируемых объектов (ОТС СН) представляет собой совокупность канальных структур, заданных множествами световых путей и передаваемыми в них оптическими сигналами. Под световым путем в модели понимается составной оптический канал, сформированный на основе диапазонов частот в последовательности ВОЛС и обеспечивающий распространение оптического сигнала в заданной полосе частот между двумя узлами без ОЗО-преобразования [13].

С помощью функции моделирования каждой ОТС СН (объекту моделирования) может быть поставлена в соответствие канальная структура (объект-образ). При этом вход и выход модели представляют собой сложные конструкции — физическую и канальную структуры ОТС СН соответственно, а функция моделирования является оператором. В качестве правил отображения выступают способы и методы выбора видов модуляции и/или типов сигналов в оптических

транспондерах (мультиплексерах), а также маршрутизации и назначения спектра для световых путей при заданных ограничениях, определяемых физической структурой.

Каждому образу моделируемой ОТС СН также ставится в соответствие набор значений исследуемых параметров: пропускная способность ОТС СН, максимальный поток в информационном направлении, качество передачи в световых путях, качество цифровых каналов и групповых трактов, экономические показатели и др. [14]. Требования к перечисленным параметрам определяются суперсистемой (надсистемой). Основной целью ОТС СН является перенос и распределение трафика между сетями доступа пунктов управления, являющихся элементами системы управления. Представляя собой суперсистему для ОТС СН, система управления определяет требования к значениям параметров ОТС СН.

Необходимо также заметить, что каждый образ ОТС СН может интерпретироваться различными прототипами ОТС СН. Это означает, что для ОТС СН, различающихся физической структурой

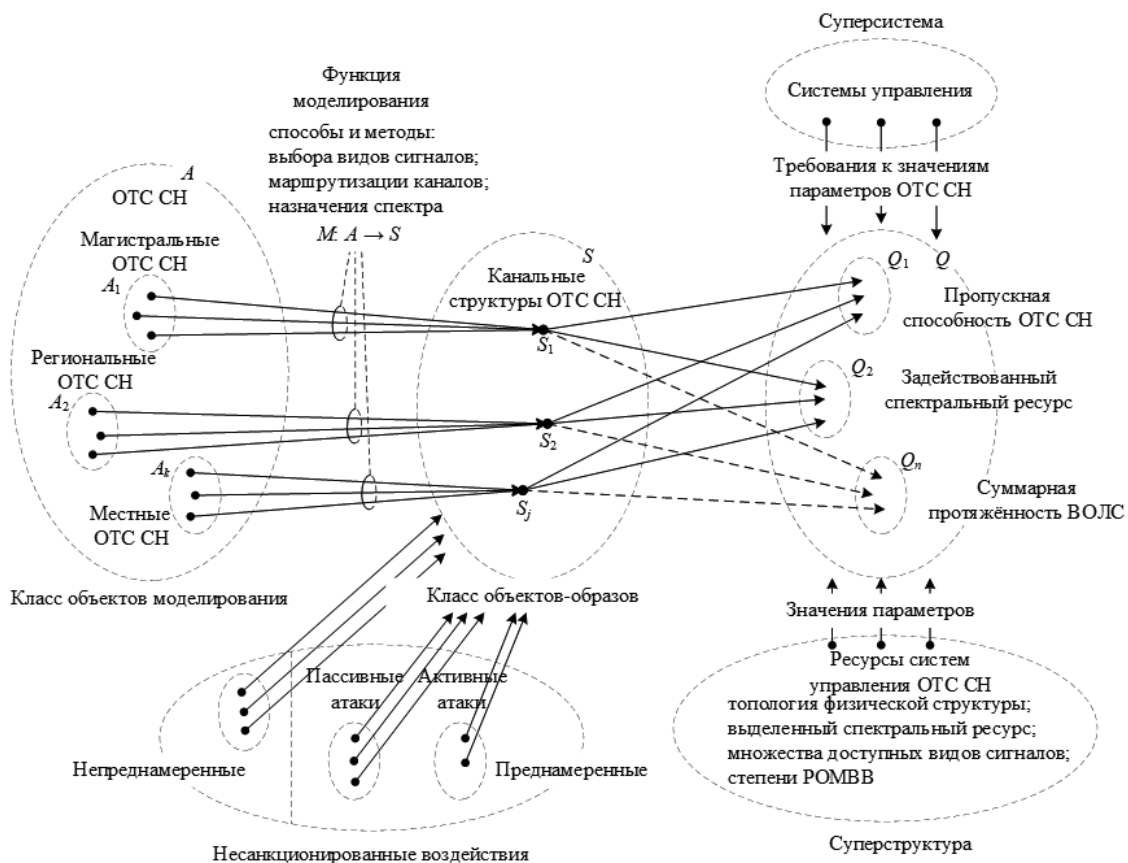


Рис. 3. Понятия, используемые при моделировании оптической транспортной сети специального назначения

турой (топологией, структурой узлов и линий), может быть сформирована канальная структура с «приблизительно одинаковыми» параметрами. Функция интерпретации, являющаяся обратной для функции моделирования, в данном случае также является оператором и позволяет решать задачу синтеза физической структуры сети при заданной канальной структуре.

Для описания возможностей подсистемы управления ОТС СН по управлению канальной структурой целесообразно ввести понятие суперструктуры ОТС СН [1]. Представляя собой ресурсы системы управления ОТС СН: заданную топологию физической структуры, структуру ВОЛС, выделенный спектральный ресурс в ВОЛС, множества доступных видов сигналов, формируемых в узлах сети, количество поддерживаемых направлений и коммутационная способность РОМБВ, суперструктура также, как и суперсистема оказывает воздействие на назначение параметров ОТС СН.

Важнейшим фактором, влияющим на множество канальных структур ОТС СН, доступных для реализации, являются несанкционированные воздействия, которые могут носить преднамеренный и непреднамеренный характер. Особое внимание в данной статье уделяется преднамеренным воздействиям на ОТС СН, которые реализуются потенциальным противником.

На рис. 3 отображены понятия, задействованные в применении модели ОТС СН на основе выделенного спектрального ресурса в условиях несанкционированных воздействий.

Модель воздействия противника на ОТС СН

Принцип построения ОТС СН на основе выделенных спектральных ресурсов предполагает множественный доступ к ВОЛС для формирования каналов и передачи оптических сигналов в интересах органов государственной власти. При этом спектральные диапазоны ВОЛС, доступные для передачи сигналов в интересах отдельных пользователей, граничат друг с другом и представляют собой непересекающиеся области спектра. Реализация множественного доступа возможна на основе различных сценариев:

- спектральный ресурс ВОЛС делится между государственными органами и организациями;

- спектральный ресурс ВОЛС делится между структурными подразделениями одного государственного органа (организации);

- спектральный ресурс ВОЛС делится между гражданскими операторами и государственными органами и организациями;

- спектральные каналы для построения ОТС СН формируются на основе гибридного способа, обобщающего три предыдущих.

При реализации множественного доступа к спектральному ресурсу ВОЛС на основе указанных сценариев одним из пользователей может стать потенциальный противник, целью которого является несанкционированное воздействие на ОТС СН. При этом спектральный ресурс ВОЛС представляет собой в определенном смысле эфир и является конфликтной средой с различными вариантами возможных угроз. Имея доступ к ресурсам оптической сети, потенциальным противником возможна реализация двух типов угроз:

- пассивные атаки, предполагающие несанкционированный доступ к спектральным каналам ОТС СН с целью перехвата передаваемой информации;

- активные атаки, заключающиеся во внедрении в сеть вредоносных сигналов, вызывающих ухудшение качества передачи в спектральных каналах ОТС СН.

Атаки на спектральные каналы реализуются путем физического подключения к оптическому волокну или сетевым элементам ОТС СН, например, к портам мониторинга оптических усилителей в составе ВОЛС или РОМБВ. Физическое подключение к оптическому волокну — непростая задача, требующая вскрытия защитного материала и оболочки, что легко может привести к поломке.

Подключение к портам мониторинга сетевых элементов, в свою очередь, требует непосредственного доступа в специализированные помещения ОТС СН с размещенным в них оборудованием.

Другой класс атак в волоконно-оптических системах передачи со спектральным разделением реализуется на основе доступа к определенному диапазону частот ВОЛС за счет утечки мощности оптических сигналов из одних диапазонов частот в другие в результате межканальных перекрестных помех.

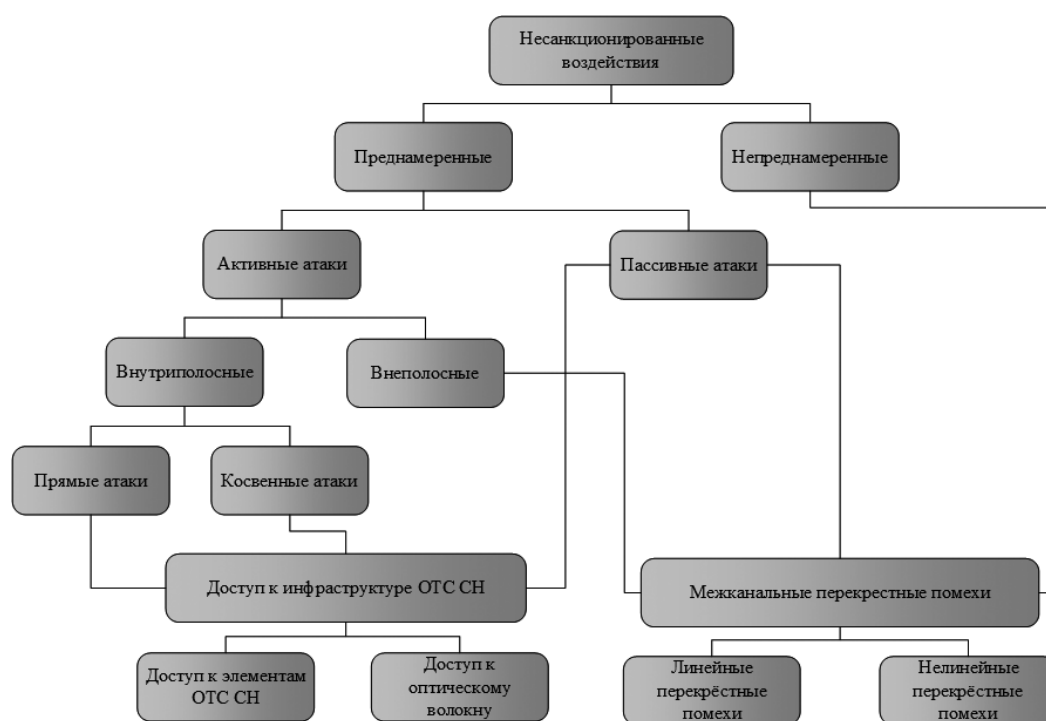


Рис. 4. Классификация несанкционированных воздействий

На рис. 4 представлена классификация несанкционированных воздействий на ОТС СН. На схеме видно, что непреднамеренные воздействия могут быть реализованы как активные атаки с внутриполосным подавлением и с межканальными перекрестными помехами. Причинами их появления могут стать ошибочные действия при назначении центральных частот оптических сигналов, формируемых в оптических транспондерах, некорректная работа узлового оборудования и др. Из этого следует, что класс непреднамеренных воздействий является подклассом более общего класса преднамеренных воздействий, реализуемых потенциальным противником.

Заключение

Современные оптические сети строятся на новых физических принципах, которые порождают дополнительные системы ограничений и рисков, ранее не учитываемых при моделировании ОТС СН. Задача формирования канальной структуры в данных сетях состоит из трех взаимосвязанных подзадач, последовательное решение которых не дает строго оптимального решения общей задачи. Эти подзадачи включа-

ют: выбор видов передаваемых сигналов, поиск и выбор маршрутов, назначение спектра. Особенности ОТС СН, связанные с ограничениями выделенного спектрального ресурса и несанкционированными воздействиями, ограничивают множества допустимых решений каждой из подзадач. Так, множество допустимых маршрутов световых путей ограничивается в результате особенностей передачи оптических сигналов без ОЗО-преобразований. Метрика качества световых путей также должна учитывать виды передаваемых сигналов и их взаимосвязи, а также ограничения на частотные характеристики. При назначении спектра световым путям необходимо учитывать ограничения, обусловленные выделяемым спектральным ресурсом в ОТС СН, и требования к непрерывности частот в пределах всего маршрута светового пути. Выбор передаваемых сигналов должен осуществляться на основе множеств допустимых оптических сигналов, сформированных с учетом ограничений на их взаимные влияния. Кроме того, каждая из подзадач должна решаться в условиях ограничений, накладываемых рисками нарушения безопасности и устойчивости ОТС СН в результате возможных межканальных воздействий.

Направлением дальнейших исследований авторского коллектива статьи является разработка математических моделей воздействия противника на ОТС СН на основе межканальных перекрестных помех, что позволит повысить эффективность управления канальной структурой в условиях преднамеренных угроз.

Список источников

1. Барашков П.Н., Родимов А.П., Ткаченко К.А., Чуднов А.М. Модель системы связи с управляемыми структурами в конфликтных условиях. Л.: ВАС, 1986. 52 с.

2. Стародубцев Ю.И., Иванов С.А., Закалкин П.В. Концептуальные направления решения проблемы обеспечения устойчивости Единой сети электросвязи Российской Федерации // Военная мысль. 2021. № 4. С. 39–49.

3. Макаренко С.И. Описательная модель сети связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 113–164.

4. Иванов В.Г. Модель технической основы системы управления специального назначения в едином информационном пространстве на основе конвергентной инфраструктуры системы связи: монография. СПб.: Политех-Пресс, 2018. 214 с.

5. Люпес В., Веласко Л. Архитектура, технологии и управление эластичных оптических сетей. Люксембург: Спрингер, 2016. 299 с.

6. Биджой С.С., Эйдзи О., Биджой К.С. Эластичные оптические сети: основы, проектирование, контроль и управление. Нью-Дели: Южно-Азиатский университет, 2020. 232 с.

7. Куан Д. По-настоящему открытые подводные кабели с совместным использованием спектра в Азиатско-Тихоокеанском регионе [Электронный ресурс] // Новости и идеи Infinera. 2024. 7 мая. URL: <https://www.infinera.com/blog/truly-open-subsea-cables-with-spectrum-sharing-in-the-asia-pacific-region/tag/submarine> (дата обращения: 09.07.2024).

8. Что такое совместное использование спектра? [Электронный ресурс] // Новости компании Ciena Company. 2020. URL: <https://www.ciena.com/insights/what-is/What-Is-Spectrum-Sharing.html> (дата обращения: 09.07.2024).

9. Хома Дж. От аренды длин волн к общему спектру. [Электронный ресурс] // Новости компании Ribbon Communications Inc. 2020.

26 июня. URL: <https://ribboncommunications.com/company/media-center/blog/alien-wavelengths-shared-spectrum> (дата обращения: 09.07.2024).

10. Ван Ю., Нгуен Л. и Ху К. Виртуализация сетевых функций в эластичных оптических сетях // Журнал световых технологий. 2023. Том 41. № 6. С. 5183–5192.

11. Чуднов А.М. Математические основы моделирования, анализа и оптимизации систем: монография. СПб.: ВАС, 2021. 168 с.

12. Бойко А.П., Одоевский С.М., Кузин П.И. Формирование оптической транспортной сети специального назначения на основе выделенного спектрального ресурса // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2024. № 3–4 (191–192). С. 58–64.

13. Бойко А.П., Кузин П.И., Кузина Е.И. Модель светового пути в оптических транспортных сетях // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2024. № 3–4 (191–192). С. 29–36.

14. Бойко А.П., Константинова А.А., Кузин П.И. и др. Математическая модель оптических транспортных сетей связи специального назначения на основе выделенного спектрального ресурса // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: сб. науч. ст. XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции в 4 т., Санкт-Петербург, 27–28 февраля 2024 года. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2024. С. 112–117.

References

1. Barashkov P.N., Rodimov A.P., Tkachenko K.A., Chudnov A.M. Model of communication system with controlled structures in conflict conditions. L.: VAS, 1986. 52 p.

2. Starodubtsev Yu.I., Ivanov S.A., Zakalkin P.V. Conceptual directions of solving the problem of ensuring the stability of the Unified Telecommunications Network of the Russian Federation // Voennaya Mysl. 2021. No 4. Pp. 39–49.

3. Makarenko S.I. Descriptive model of the special purpose communication network // Control, communication and security systems. 2017. No 2. Pp. 113–164.

4. Ivanov V.G. Model of the technical basis of the special purpose control system in the unified information space on the basis of convergent infrastructure of the communication system. Monograph. SPb.: Politech-press, 2018. 214 p.
5. Lupes V., Velasco L. Architecture, technology and management of elastic optical networks. Luxemburg: Springer, 2016. 299 p.
6. Bijoy S.S., Eiji O. Elastic optical networks: fundamentals, design, control and management. New Delhi: South Asian University, 2020. 232 p.
7. Quan D. Truly open submarine cables with spectrum sharing in Asia-Pacific [Electronic resource] // Infinera News & Insights. 2024. May 7. URL: <https://www.infinera.com/blog/truly-open-subsea-cables-with-spectrum-sharing-in-the-asia-pacific-region/tag/submarine> (date of access: 09.07.2024).
8. What is spectrum sharing? [Electronic resource] // Ciena Company News. 2020. URL: <https://www.ciena.com/insights/what-is/What-Is-Spectrum-Sharing.html> (date of access: 09.07.2024).
9. Homa J. From wavelength lease to shared spectrum. [Electronic resource] // News from Ribbon Communications Inc. 2020. June 26. URL: <https://ribboncommunications.com/company/media-center/blog/alien-wavelengths-shared-spectrum> (date of access: 09.07.2024).
10. Van Y., Nguyen L., Hu C. Virtualization of network functions in elastic optical networks // Journal of Lighting Technology. 2023. Vol. 41. No 16. Pp. 5183–5192.
11. Chudnov A.M. Mathematical bases of modeling, analysis and optimization of systems / Monograph // St. Petersburg: BAC, 2021. 168 p.
12. Boyko A.P., Odoevsky S.M., Kuzin P.I. Formation of a special-purpose optical transport network on the basis of a dedicated spectral resource // Defense Engineering Issues. Series 16. Technical means of counteraction to terrorism. 2024. No 3–4 (191–192). Pp. 58–64.
13. Boyko A.P., Kuzin P.I., Kuzina E.I. Model of the light path in optical transport networks // Defense Technology Issues. Series 16. Technical means of counteraction to terrorism. 2024. No 3–4 (191–192). Pp. 29–36.
14. Boyko A.P., Konstantinova A.A., Kuzin P.I. et al. Mathematical model of optical transport networks for special-purpose communications based on the allocated spectral resource // Actual problems of infotelecommunications in science and education: Collection of scientific articles of XIII International scientific and technical and scientific-methodical conference in 4 vol., St. Petersburg, February 27–28, 2024. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. M.A. Bonch-Bruевич, 2024. Pp. 112–117.