

УДК 621.395.74

doi: 10.53816/23061456\_2025\_3-4\_85

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ  
ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ  
ЗА СЧЕТ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АРЕНДУЕМЫХ  
СПЕКТРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ**

**INCREASING THE CAPACITY OF SPECIAL-PURPOSE OPTICAL TRANSPORT  
NETWORKS THROUGH EFFICIENT USE OF LEASED SPECTRAL RESOURCES**

*Канд. техн. наук А.П. Бойко<sup>1</sup>, д-р техн. наук С.М. Одоевский<sup>2</sup>,  
д-р техн. наук Ю.И. Стародубцев<sup>1</sup>*

*Ph.D. A.P. Boyko, D.Sc. S.M. Odoevsky, D.Sc. Yu.I. Starodubtsev*

*<sup>1</sup>Военная академия связи им. С.М. Буденного,*

*<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет*

Современные оптические транспортные сети специального назначения формируются на основе арендуемых телекоммуникационных ресурсов, виды которых постоянно совершенствуются, порождая при этом как дополнительные возможности, так и новые виды угроз. Одним из наиболее ожидаемых сценариев развития оптической связи является переход к аренде спектра в волоконно-оптической инфраструктуре операторов связи. Это позволит увеличить пропускную способность оптических транспортных сетей специального назначения за счет оптимизации распределения спектральных каналов. В статье приводятся направления развития телекоммуникационных услуг, аренда которых позволит повысить эффективность оптических транспортных сетей специального назначения. Поднят вопрос появления системы дополнительных угроз, обусловленных множественным доступом к элементам физической инфраструктуры операторов сетей общего пользования.

**Ключевые слова:** оптические транспортные сети, аренда спектра, пропускная способность.

Modern special-purpose optical transport networks are formed on the basis of leased telecommunication resources, the types of which are constantly being improved, giving rise to both additional opportunities and new types of threats. One of the most anticipated scenarios for the development of optical communications is the transition to spectrum leasing in the fiber-optic infrastructure of telecom operators. This will increase the capacity of special-purpose optical transport networks by optimizing the distribution of spectral channels. The article presents the directions for the development of telecommunication services, the leasing of which will increase the efficiency of special-purpose optical transport networks. The issue of the emergence of a system of additional threats caused by multiple access to elements of the physical infrastructure of public communication network operators is raised.

**Keywords:** optical transport networks, spectrum leasing, network bandwidth.

## Введение

В соответствии с законодательством Российской Федерации (РФ) сети связи Единой сети электросвязи РФ (ЕСЭ РФ) разделяются по функциональному признаку на транспортные сети и сети доступа [1]. Транспортная сеть представляет собой совокупность ресурсов систем передачи (каналов, трактов, секций или участков передачи), относящихся к ним средств контроля, оперативного переключения, резервирования и управления, предназначенных для переноса и распределения разнородного трафика между сетями доступа. Транспортные сети на основе телекоммуникационных технологий, использующих в качестве среды распространения сигналов оптическое волокно, принято называть оптическими транспортными сетями (ОТС). ОТС, на основе которых организуются службы и услуги связи для нужд органов государственной власти (МО РФ, ФСБ РФ, ФСО РФ и др.) относятся к категории сетей связи специального назначения (СС СН) и формируются с использованием телекоммуникационных ресурсов операторов связи ЕСЭ РФ.

Главной причиной использования арендуемых телекоммуникационных ресурсов является недостаточная развитость инфраструктур СС СН. Учитывая возможности по обеспечению пропускной способности, а также вклад проводной связи в объемы передаваемой информации на СС СН, основная часть арендуемых телекоммуникационных ресурсов приходится на проводную часть ЕСЭ РФ. Несмотря на экономическую выгоду: аренда телекоммуникационных ресурсов обходится значительно дешевле, чем строительство собственной инфраструктуры (включая прокладку кабелей и установку оборудования), данный подход обладает множеством недостатков и рисков, которые необходимо учитывать.

В разные периоды развития СС СН технические принципы задействования ресурсов операторов связи ЕСЭ РФ принимали различную форму, в зависимости от уровня развития протоколов и технологий, применяемых в гражданской сфере связи и телекоммуникаций. Так, в течение длительного времени арендуемыми телекоммуникационными ресурсами являлись каналы, образованные аналоговыми многоканальными системами передачи: каналы тональной частоты и

телеграфные каналы. Однако опережающее развитие сетей связи общего пользования (СС ОП) затруднило процедуры сопряжения и интеграции с СС СН на основе устаревшей аналоговой аппаратуры, а отказ от морально устаревшей аналоговой техники стал одной из причин перехода на аренду цифровых каналов и групповых трактов.

С началом перехода систем связи СН на цифровую связь в начале нулевых, основным арендуемым телекоммуникационным ресурсом стали первичные цифровые групповые тракты Е1 плезиохронной цифровой иерархии (ПЦИ), которые и в настоящее время используются в качестве основы подсистем переноса при построении транспортных сетей СН [2]. При этом необходимо заметить, что сама технология ПЦИ не относится к технологиям транспортных сетей, в основном из-за ограниченных возможностей по управлению и мониторингу сети.

Рост популярности технологий коммутации пакетов в гражданской связи [3], в том числе и для построения транспортных сетей, а также отсутствие возможности прямого сопряжения плезиохронной и оптической транспортной иерархий, широко применяемых на СС ОП, способствовали тому, что арендуемым телекоммуникационным ресурсом стали сетевые соединения на основе виртуальных частных сетей VPN (virtual private network). При этом возникла реальная угроза маршрутизации внутреннего трафика СС СН через зарубежные сети, в том числе и страны НАТО, имеющие подключения к сетям операторов связи ЕСЭ РФ.

Таким образом, описанный подход к формированию транспортных сетей СН на основе арендуемых телекоммуникационных ресурсов канального и сетевого уровней обладает рядом недостатков, связанных с угрозами безопасности связи, а также невозможностью обеспечения требуемой устойчивости, доступности и пропускной способности. В работах [4–6] подробно изложены проблемные вопросы, обусловленные использованием в системах связи СН канальных и сетевых ресурсов, арендуемых у коммерческих операторов связи.

Для разрешения указанных проблем в 2018 году было принято решение о создании Интегрированной сети связи (ИСС) для нужд обороны страны, безопасности государства и поддержания правопорядка, представляющей собой

единую телекоммуникационную транспортную основу для взаимодействия и функционирования ОТС СН. В частности, в интересах передачи разнородного информационного трафика между объектами МО РФ в настоящее время на завершающей стадии, находится создание Мультисервисной транспортной сети связи МО РФ (МТСС МО РФ). Основное препятствие созданию разветвленных и протяженных ОТС СН заключается, прежде всего, в отсутствии достаточного количества собственных волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Данная проблема, как и прежде, решается путем аренды телекоммуникационных ресурсов.

Принципиально новое отличие концепции построения современных ОТС СН заключается в формировании каналов и трактов на основе доверенной активной телекоммуникационной инфраструктуры, являющей собой выделенные физические линейные ресурсы: оптические кабели, отдельные пары оптических волокон, длины волн, в том числе и арендуемые у операторов ЕСЭ РФ. Построение транспортных сетей СН на основе отечественного сертифицированного оборудования, с использованием арендуемых пассивных телекоммуникационных ресурсов физического уровня, существенно снижает риски внешних деструктивных воздействий, однако не исключает их полностью. Кроме того, появляются новые виды угроз на физическом уровне, требующие проведения дополнительных исследований.

Резюмируя изложенное, можно сделать следующие выводы:

- при построении СС СН активно сохраняется тенденция использования телекоммуникационных ресурсов СС ОП;
- СС СН продолжают критически зависеть от состояния инфраструктуры и технологических возможностей СС ОП;
- технические принципы использования телекоммуникационных ресурсов операторов связи ЕСЭ РФ постоянно совершенствуются, в соответствии с направлениями развития протоколов и технологий, применяемых на СС ОП.

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

транспортных сетей 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, адаптированные к возможным деструктивным воздействиям, в особенности преднамеренного характера.

Коммерческие операторы связи по всему миру непрерывно совершенствуют свои транспортные услуги, предоставляя в аренду телекоммуникационные ресурсы на разных уровнях: физическом, канальном и сетевом. При формировании СС СН выбор конкретного вида услуг должен осуществляться на основе исследований их достоинств и недостатков, а также возможных рисков. Учитывая возможности оптической связи и её вклад в объем передаваемой информации, не вызывает сомнения тот факт, что основную роль при передаче и распределении трафика в системах связи СН будут играть ОТС СН, построенные с использованием арендованных телекоммуникационных ресурсов на новых физических принципах.

В настоящее время ОТС составляют ядро практически любой телекоммуникационной инфраструктуры, на которое приходится перенос (транспортировка) и распределение основных объемов трафика. При этом тенденции развития ОТС коммерческих операторов связи направлены на удовлетворение растущих потребностей в объемах передаваемой информации. Одним из направлений увеличения пропускной способности современных оптических сетей является переход на гибкую сетку частот [7, 8], что обеспечивает более эффективное и гибкое использование спектра оптических волокон. В отличие от традиционных сетей с фиксированной сеткой частот (50 ГГц или 100 ГГц), гибкая сетка частот позволяет изменять ширину канала в зависимости от потребностей трафика и характеристик сигнала. Например, если для передачи данных требуется канал шириной 37,5 ГГц вместо стандартных 50 ГГц, то гибкая сетка может обеспечить именно такую ширину, что освобождает спектральное

пространство для других каналов. Это приводит к увеличению общего количества спектральных каналов, которые могут быть переданы по одному и тому же волокну, повышая тем самым спектральную эффективность.

В совокупности с реконфигурируемыми оптическими мультиплексорами ввода/вывода (РОМВВ), широко внедряемыми в современные оптические сети, в том числе и в России, в ОТС с гибкой сеткой частот также имеется возможность динамически изменять параметры сети, адаптируясь к изменениям трафика и требуемой пропускной способности. Функции программной коммутации и маршрутизации спектра в современных РОМВВ позволяют распределять его между корреспондирующими узлами в зависимости от текущей необходимости к количеству и качеству спектральных каналов между ними. За счет этого достигается оптимизация использования спектра в оптической сети, который представляет собой новый телекоммуникационный ресурс в гражданской связи [9–12]. Аренда спектра в оптических сетях — это новая услуга, предоставляемая операторами и провайдерами связи, которая позволяет арендаторам использо-

вать определенные частотные диапазоны в ВОЛС для формирования спектральных каналов на основе собственного, доверенного оборудования. 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 деструктивных воздействий на физическом уровне.

Совместное использование спектра в ВОЛС, известное в иностранной литературе как Spectrum Sharing, позволяет представить пару оптических волокон в виде множества виртуальных оптических волокон, а их совокупность в виде виртуальной оптической сети. На основе физической инфраструктуры операторов связи формируется множество изолированных ОТС, в том числе и СН. Оптическая инфраструктура при этом условно разделяется на физическом уровне, а её пользователи имеют возможность осуществлять контроль над маршрутизацией спектральных каналов и управлением своей частью виртуальной оптической сети [13]. На рис. 1 представлена топология виртуальной ОТС СН,

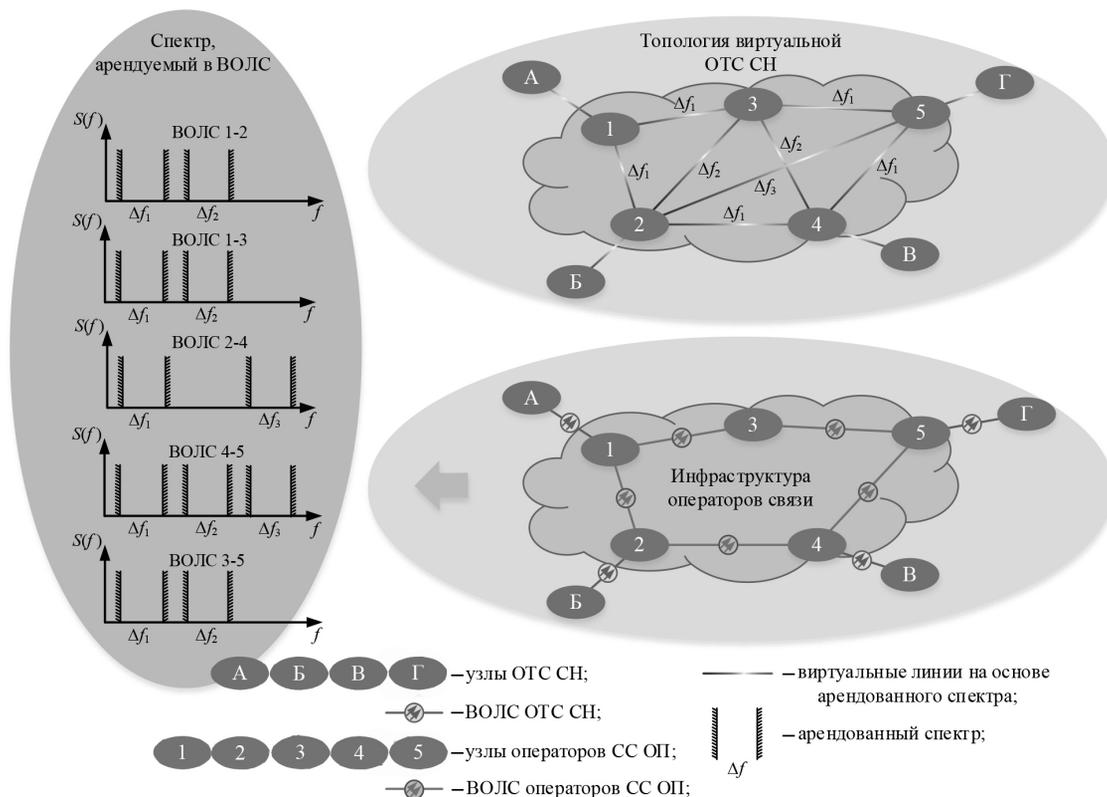


Рис. 1. ОТС СН на основе инфраструктуры операторов связи

сформированной с использованием инфраструктуры операторов связи на основе арендуемых спектральных ресурсов.

Узлы ОТС СН с помощью собственных ВОЛС, как правило незначительной протяженности, присоединяются к узлам операторов СС ОП, в которых предоставляется телекоммуникационная услуга — арендованный спектр. На рис. 1 представлен спектр, арендуемый в ВОЛС, принадлежащих инфраструктуре операторов связи. Поддиапазоны  $\Delta f_2$  и  $\Delta f_3$  в ВОЛС операторов связи СС ОП используются для формирования дополнительных линий: 2–3, 3–4, 2–5 в топологии виртуальной ОТС СН, которые отсутствовали в исходной топологии сети операторов связи. Таким образом формируется топология с более высокими показателями связности, увеличивая тем самым мощность множества возможных для реализации канальных структур.

Гибкость в управлении канальной структурой ОТС СН — главное достоинство данного подхода, позволяющее более эффективно использовать арендуемые спектральные ресурсы. Возможность динамического перераспределения спектральных каналов в условиях изменения требований к скорости передачи между корреспондирующими узлами ОТС СН позволяет оптимизировать использование спектра ВОЛС. В пределах одной и той же топологии виртуальной оптической сети возможна реализация множества канальных структур, отличающихся маршрутами спектральных каналов, скоростью передачи и видами модуляции (типами кодирования) оптических сигналов. Выбор варианта канальной структуры осуществляется исходя из текущих потребностей в информационном обмене между узлами ОТС СН.

На рис. 2 представлена иллюстрация, поясняющая принцип управления канальной структурой в условиях изменяющихся потребностей в передаче трафика между корреспондирующими узлами ОТС СН. На рис. 2, а спектральные каналы между корреспондирующими узлами ОТС СН распределены так, что представленные в таблице скорости передачи одинаковые. На рис. 2, б продемонстрировано, как часть спектрального ресурса в линии 1–2 и 2–3 используется для увеличения скорости передачи между корреспондирующими узлами А–В. При этом скорости передачи между узлами А–Б и Б–В

уменьшаются. В таблице к рис. 2, б представлены значения скоростей передачи.

Оба варианта канальной структуры реализованы на одной и той же виртуальной оптической сети. При этом маршруты каналов сформированы по принципу кратчайшего пути. Исключение составляет спектральный канал между узлами А–В на рис. 2, б со спектром и оптического сигнала 40 Гбит/с. Его маршрут состоит из двух линий 1–2 и 2–3, так как весь спектральный ресурс в линии 1–3 занят. На рис. 2 представлены два варианта из множества канальных структур, реализуемых на одной и той же топологии виртуальной ОТС СН.

При распределении трафика по спектральным каналам с независимыми маршрутами, образующими направление связи и определяющими его суммарную пропускную способность, повышаются показатели надежности и живучести. При этом снижается суммарная пропускная способность всех направлений связи в сети если не выделяются дополнительные спектральные ресурсы в ВОЛС.

Несмотря на то, что аренда спектра в ВОЛС операторов связи ЕСЭ РФ и формирование на его основе виртуальной оптической сети, при построении ОТС СН, является многообещающим решением завтрашнего дня, в данном подходе появляются дополнительные угрозы физического уровня. При реализации множественного доступа к спектральному ресурсу ВОЛС, одним из пользователей, может стать потенциальный противник, целью которого является деструктивное воздействие на ОТС СН. При этом спектральный ресурс ВОЛС представляет собой в определенном смысле эфир, и является конфликтной средой с различными вариантами возможных угроз.

Оба варианта канальной структуры реализованы на одной и той же виртуальной оптической сети. При этом маршруты каналов сформированы по принципу кратчайшего пути. Исключение составляет спектральный канал между узлами А–В на рис. 2, б подкрашенный зеленым цветом. Его маршрут состоит из двух линий 1–2 и 2–3, так как весь спектральный ресурс в линии 1–3 занят. На рис. 2 представлены два варианта из множества канальных структур, реализуемых на одной и той же топологии виртуальной ОТС СН.

При распределении трафика по спектральным каналам с независимыми маршрутами, об-

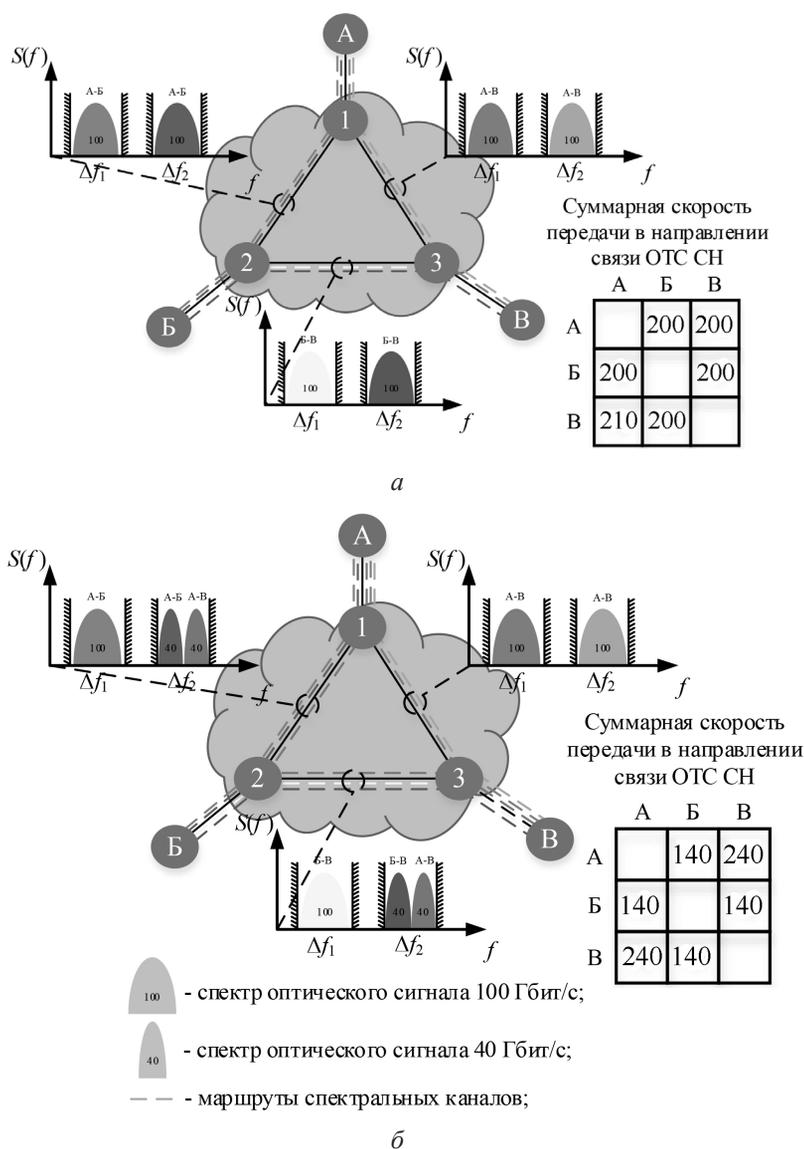


Рис. 2. Распределение оптических каналов в пределах арендованного спектрального ресурса

разующими направление связи и определяющими его суммарную пропускную способность, повышаются показатели надежности и живучести. При этом снижается суммарная пропускная способность всех направлений связи в сети если не выделяются дополнительные спектральные ресурсы в ВОЛС.

Несмотря на то что аренда спектра в ВОЛС операторов связи ЕСЭ РФ и формирование на его основе виртуальной оптической сети, при построении ОТС СН, является многообещающим решением завтрашнего дня, в данном подходе появляются дополнительные угрозы физического уровня. При реализации множественного дос-

тупа к спектральному ресурсу ВОЛС, одним из пользователей может стать потенциальный противник, целью которого является деструктивное воздействие на ОТС СН. При этом спектральный ресурс ВОЛС представляет собой в определенном смысле эфир, и является конфликтной средой с различными вариантами возможных угроз.

Особый интерес представляют атаки, реализуемые за счет межканальных перекрестных помех. Возникающие в результате нелинейных эффектов в оптическом волокне, они могут носить как преднамеренный, так и не преднамеренный характер. Пассивные атаки предполагают несанкционированный доступ к спектральным ка-

налам ОТС СН с целью перехвата передаваемой информации. Активные атаки заключаются во внедрении в сеть вредоносных сигналов, вызывающих ухудшение качества передачи в спектральных каналах ОТС СН.

На этапе проектирования, а также в процессе эксплуатации для получения информации о важнейших свойствах ОТС СН, сформированных на основе арендованных спектральных ресурсов, необходимы полные, адекватные, непротиворечивые модели, учитывающие риски возможных деструктивных воздействий.

### Заключение

ОТС СН представляют собой ядро системы связи СН, реализующее функцию переноса основных объемов трафика как в мирное, так и в военное время. При построении ОТС СН нехватка собственных телекоммуникационных ресурсов восполняется за счет аренды у операторов связи ЕСЭ РФ. Необходимость сопряжения СС СН и СС ОП вследствие опережающего развития последних способствует тому, что на СС СН активно применяются технологии и протоколы гражданской связи. Коммерческие операторы связи по всему миру постоянно работают над улучшением и расширением множества телекоммуникационных ресурсов, предоставляемых в аренду. При построении СС СН аренда телекоммуникационных ресурсов физического уровня представляет особую ценность, так как позволяет устранить множество потенциальных угроз на канальном и сетевом уровнях. В современных коммерческих сетях набирает популярность новый вид телекоммуникационных услуг: аренда спектра в ВОЛС операторов связи. Представляющий собой диапазоны частот в ВОЛС для формирования спектральных каналов ОТС СН, данный телекоммуникационный ресурс является развитием и обобщением используемого ранее телекоммуникационного ресурса: длин волн. Его главное достоинство заключается в возможности управления спектральными каналами в пределах выделенного спектрального ресурса и изменении скорости передачи в них, в зависимости от изменений требований к передаче в направлениях связи. Описанный в данной статье подход позволит увеличить пропускную способность ОТС СН, за счет повышения эффективности исполь-

зования арендуемых телекоммуникационных ресурсов физического уровня. При этом возникают дополнительные риски, связанные с появлением новых возможных угроз при совместном использовании инфраструктуры операторов связи, которые необходимо учитывать и объективно оценивать.

### Список источников

1. О связи: федер. закон Рос. Федерации от 07 июля 2003 № 126-ФЗ: принят Гос. Думой Федер. Собр. Рос. Федерации 18 июня 2003 г.: одобр. Советом Федерации Федер. Собр. Рос. Федерации 25 июня 2003 г. // Рос. Газ. — 2003. — 20 июня.
2. Акулинчев А.Б. Проблемы цифровизации военных сетей связи и пути их решения // Военная мысль. 2006. № 9. С. 76–80.
3. О переводе системы связи ВС РФ на цифровые способы передачи информации [Электронный ресурс] // Новости компании. 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).
4. 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.
5. Макаренко С.И. Описательная модель сети связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 113–164.
6. 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.
7. Люпес В., Веласко Л. Архитектура, технологии и управление эластичных оптических сетей: Редактор серии «Оптические сети»: Бисванат Мукерджи. Спрингер, 2016. 299 с.
8. Биджой Ч.Ч., Эйджи О. Эластичные оптические сети: основы, проектирование, контроль и управление. Нью-Дели: Южно-Азиатский университет, 2020. 232 с.
9. Куан Д. По-настоящему открытые подводные кабели с совместным использовани-

ем 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).

10. 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).

11. 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).

12. Одоевский С.М., Бойко А.П., Кузин П.И. Формирование оптической транспортной сети специального назначения на основе выделенного спектрального ресурса // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2024. № 5–6 (191–192). С. 58–64.

13. Ван Ю., Нгуен Л. и Ху К. Виртуализация сетевых функций в эластичных оптических сетях // Журнал световых технологий. 2023. Т. 41. № 16. С. 5183–5192.

## References

1. On Communications: Feder. Law No. 126-FZ of July 07, 2003: adoption by the State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation. The collection grew. Of the Russian Federation on June 18, 2003; approval by the Federation Council on June 25, 2003 // Russ. Newsp. — 2003— 20.0.

2. Akulinchev A.B. Problems of digitalization of military communication networks and ways to solve them // Military thought. 2006. No 9. Pp. 76–80.

3. On the transfer of the communication system of the Armed Forces of the Rus. Federation to digital methods of information transmission [Electronic resource] // Company News. 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: 07/09/2024).

4. Starodubtsev Yu.I., Ivanov S.A., Zakalkin P.V. Conceptual directions for solving the problem of ensuring the stability of the Unified telecommunication network of the Russian Federation // Military thought. 2021. No 4. Pp. 39–49.

5. Makarenko S.I. Descriptive model of a special-purpose communication network // Management, communication and security systems. 2017. No 2. Pp. 113–164.

6. Ivanov V.G. A model of the technical basis of a special-purpose management system in a single information space based on a converged communications system infrastructure. Monograph. St. Petersburg: Polytech Press, 2018. 214 p.

7. Lupes V., Velasco L. Architecture, technologies and management of elastic optical networks: Editor of the Optical Networks series: Biswanath Mukherjee. Springer, 2016. 299 p.

8. Bijoy Ch.Ch., Agee O. Elastic optical networks: fundamentals, design, control and management. New Delhi: South Asian University, 2020. 232 p.

9. Kuan D. Truly open underwater cables with spectrum sharing in the Asia-Pacific region [Electronic resource] // Infinera news and Ideas. 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: 07/09/2024).

10. 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: 07/09/2024).

11. Homa J. From the rental of wavelengths to the general 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: 07/09/2024).

12. Odoevsky S.M., Boyko A.P., Kuzin P.I. Formation of a special-purpose optical transport network based on a dedicated spectral resource // Issues of defense technology. Episode 16. Technical means of countering terrorism. 2024. No 5–6 (191–192). Pp. 58–64.

13. Wang Yu., Nguyen L. and Hu K. Virtualization of network functions in elastic optical networks // Journal of Lighting Technologies. 2023. Vol. 41. No 16. Pp. 5183–5192.