

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.144.144>

ВИДЫ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ПРОТОКОЛАХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Научная статья

Климахина О.И.^{1,*}, Малахов С.В.², Якупов Д.О.³

^{1,2,3} Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (klimakhinao[at]gmail.com)

Аннотация

В мире современных технологий, где поток информации непрерывно растет, эффективное управление передачей данных становится неотъемлемой частью любой сетевой инфраструктуры. Мультиплексирование является ключевым аспектом этого процесса. Оно позволяет комбинировать несколько потоков данных в одном канале связи, повышая эффективность использования сетевых ресурсов. Изучение видов мультиплексирования в различных протоколах передачи данных имеет высокую актуальность в современном мире информационных технологий. Рассматриваются основные виды мультиплексирования. Для каждого вида мультиплексирования описывается принцип работы, преимущества и недостатки, а также примеры применения в современных сетевых технологиях. Исследование представляет ценную информацию для специалистов в области сетевых технологий, помогая им лучше понять принципы организации передачи данных и выбирать наиболее подходящие методы мультиплексирования для конкретных сценариев использования. С постоянным развитием сетей передачи данных, включая интернет, облачные технологии, мобильные сети и прочее, возникает необходимость в эффективных методах управления потоками данных.

Ключевые слова: мультиплексирование, передача данных, протоколы связи.

TYPES OF MULTIPLEXING IN DIFFERENT DATA TRANSFER PROTOCOLS

Research article

Klimakhina O.I.^{1,*}, Malakhov S.V.², Yakupov D.O.³

^{1,2,3} Volga Region State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation

* Corresponding author (klimakhinao[at]gmail.com)

Abstract

In the world of modern technology, where the flow of information is constantly increasing, efficient data transmission management is becoming an integral part of any network infrastructure. Multiplexing is a key aspect of this process. It allows multiple data streams to be combined on a single communication channel, increasing the efficiency of network resource utilization. The study of multiplexing types in various data transmission protocols is highly relevant in the modern world of information technologies. The main types of multiplexing are examined. For each type of multiplexing describes the principle of operation, advantages and disadvantages, as well as examples of application in modern network technologies. The study provides valuable information for networking professionals, helping them to better understand the principles of data transmission organization and to select the most appropriate multiplexing techniques for specific usage scenarios. With the continuous development of data networks, including the Internet, cloud technologies, mobile networks and others, there is a need for efficient methods to manage data flows.

Keywords: multiplexing, data transmission, communication protocols.

Введение

Целью исследования является рассмотрение различных видов мультиплексирования в сетях передачи данных и их применение в различных протоколах, проанализировать особенности каждого вида мультиплексирования, выявить их преимущества и недостатки, а также исследовать их влияние на эффективность передачи данных в сети.

Важно рассмотреть основные протоколы передачи данных. Каждый протокол имеет свои уникальные особенности, которые влияют на способы организации передачи информации в сети. Важно понимать, как данные структурированы и передаются по сети для эффективного применения методов мультиплексирования. Мультиплексирование – это техника, позволяющая объединять несколько потоков данных в один канал связи (см. рис. 1). Этот процесс является ключевым для повышения пропускной способности сети и эффективного управления передачей информации. Изучив роль мультиплексирования, мы сможем лучше понять, как данные организованы и передаются в современных сетях [1].



Рисунок 1 - Схематичное изображение мультиплексирования
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.144.144.1>

Существуют проблемы, связанные с использованием различных методов мультиплексирования:

Ресурсы: Каждый метод мультиплексирования (TDM, FDM, WDM) требует определенных ресурсов. Например, TDM требует точной синхронизации времени между различными потоками данных, FDM требует достаточной полосы пропускания для размещения каждого сигнала на уникальной частоте, а WDM требует специализированного оборудования для генерации и обнаружения света на различных длинах волн. Эти требования могут увеличивать сложность и стоимость системы.

Производительность: Производительность системы связи может быть ограничена выбранным методом мультиплексирования. Например, в системе, использующей TDM, если один из потоков данных испытывает задержку, это может повлиять на все остальные потоки. В системе, использующей FDM или WDM, интерференция между сигналами на соседних частотах или длинах волн может привести к ухудшению качества сигнала [1], [2].

Масштабируемость: Методы мультиплексирования могут ограничивать масштабируемость системы. Например, в системе, использующей TDM, добавление большего количества потоков данных может потребовать увеличения скорости канала. В системе, использующей FDM или WDM, добавление большего количества сигналов может потребовать увеличения полосы пропускания канала или использования более коротких длин волн, что может потребовать более дорогостоящего оборудования [1], [3].

Совместимость с протоколами передачи данных: Не все протоколы передачи данных могут быть совместимы со всеми методами мультиплексирования. Например, некоторые протоколы могут быть разработаны для работы с TDM и не совместимы с FDM или WDM. Это может ограничивать выбор метода мультиплексирования в зависимости от используемых протоколов передачи данных.

Все эти проблемы подчеркивают важность тщательного планирования и проектирования при создании систем связи, которые используют мультиплексирование. Это включает в себя выбор подходящего метода мультиплексирования, учет доступных ресурсов, оценку требуемой производительности и масштабируемости, а также учет совместимости с протоколами передачи данных.

Протоколы передачи данных определяют набор правил и форматов, которые используются для обмена информацией между устройствами в сети. Эти протоколы обеспечивают структурированный и надежный обмен данными, регулируют передачу и прием информации, а также устанавливают стандарты для сжатия, шифрования и других аспектов обработки данных [4]. Протоколы передачи данных и методы мультиплексирования тесно взаимосвязаны, поскольку оба они играют важную роль в организации передачи данных в сети, обеспечивая ее эффективность, надежность и безопасность [5].

Мультиплексирование играет важную роль в увеличении пропускной способности сетей и оптимизации передачи данных, при этом каждый вид мультиплексирования имеет свои преимущества и недостатки, которые необходимо учитывать при выборе метода для конкретной сетевой инфраструктуры [6]. Каждый вид мультиплексирования (FDM, TDM, WDM) связан с протоколами передачи данных. Различные протоколы передачи данных используют различные виды мультиплексирования [7], [8], [9]:

1. TCP/IP:

- Частотное мультиплексирование (FDM): В случае TCP/IP, различные потоки данных могут быть мультиплексированы на различные порты транспортного уровня. Например, TCP использует порты для идентификации различных приложений на узле, что позволяет множеству приложений работать одновременно через сетевое соединение.

- Временное мультиплексирование (TDM): TCP использует sequence numbers для управления передачей данных и обеспечения порядка доставки пакетов. Это может рассматриваться как форма временного мультиплексирования, где каждый пакет получает свой временной слот и порядок для передачи.

2. Ethernet:

- Частотное мультиплексирование (FDM): Ethernet может использовать FDM через частотную модуляцию сигнала на физическом уровне. Различные устройства могут обмениваться данными через различные частоты, например, при использовании различных дуплексных режимов (полудуплекс, полнодуплекс) на одном кабеле.

- Временное мультиплексирование (TDM): Ethernet использует CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) для доступа к среде передачи данных. Этот метод решает конфликты и определяет временные интервалы для передачи данных.

3. SONET/SDH:

- Волновое мультиплексирование (WDM): SONET/SDH часто используют WDM для мультиплексирования различных потоков данных на различные цветовые волны в оптической сети. Каждая цветовая волна может нести свой поток данных с различной пропускной способностью.

- Временное мультиплексирование (TDM): SONET/SDH также используют TDM для разделения оптической линии на временные слоты для передачи данных с различными скоростями и приоритетами.

Таким образом, различные протоколы передачи данных используют различные методы мультиплексирования (FDM, TDM, WDM) для эффективной передачи данных в сети. Каждый протокол и метод мультиплексирования имеют свои особенности и применение в различных сетевых сценариях [10].

Основные результаты

Рассмотрим практическую задачу, которая анализирует различные виды мультиплексирования (TDM, FDM, WDM) в протоколах передачи данных с использованием данных.

Стоит обратить внимание, что в этих примерах предполагается, что все потоки данных передаются с одинаковой скоростью. В реальных системах скорость передачи данных может варьироваться в зависимости от потребностей каждого потока данных. Кроме того, в реальных системах могут использоваться различные методы управления доступом к каналу для обеспечения справедливого доступа к каналу для всех потоков данных.

1. Для TDM можно использовать данные времени отправки источника данных и вычислить среднее время между отправками пакетов от каждого источника.

Шаг 1: Вычисление среднего времени между передачей пакетов от каждого источника:

Пусть:

- n – количество переданных пакетов от конкретного источника,
- t_1, t_2, \dots, t_n – временные метки отправки каждого пакета от этого источника.

Среднее время между передачей пакетов (\bar{t}) можно вычислить по формуле:

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - t_{i-1})}{n}$$

Где $t_i - t_{i-1}$ – разница между временными метками отправки соседних пакетов.

Шаг 2: Определение доли времени, занимаемой передачами от каждого источника:

Пусть:

- T_{total} – общее время наблюдения,
- T_{sours} – суммарное время передачи пакетов от конкретного источника.

Доля времени, занимаемая передачами от данного источника (S), вычисляется по формуле:

$$S = \frac{T_{sours}}{T_{total}}$$

Предположим, что у нас есть следующие данные для анализа:

- Источник А отправил 100 пакетов за 100 секунд.
- Источник В отправил 150 пакетов за 120 секунд.

Для источника А:

$$\text{Среднее время} = \frac{100 \text{seconds}}{100 \text{packages}} = 1 \frac{\text{second}}{\text{package}}$$

Для источника В:

$$\text{Среднее время} = \frac{120 \text{seconds}}{150 \text{packages}} \approx 0.8 \frac{\text{second}}{\text{package}}$$

Определение доли времени, занимаемой передачами от каждого источника:

Общее время наблюдения (предположим, что это 200 секунд):

$$T_{total} = 200 \text{ секунд}$$

Для источника А:

$$S_A = \frac{100 \text{seconds}}{200 \text{seconds}} = 0.5$$

Для источника В:

$$S_B = \frac{120 \text{seconds}}{200 \text{seconds}} = 0.6$$

Предположим систему связи, которая использует TDM для передачи данных от 4 источников по одному каналу связи. Каждый источник передает данные со скоростью 1 Мбит/с. Если каждому источнику выделяется одинаковый временной интервал, то необходимо узнать, какова должна быть скорость канала.

Скорость канала можно вычислить, умножив количество источников на скорость источника. Подставляя наши значения, получаем:

$$\text{Скорость канала} = 4 * 1 \text{Mbps} = 4 \text{Mbps}$$

Таким образом, скорость канала должна быть 4 Мбит/с, чтобы поддерживать передачу данных от 4 источников со скоростью 1 Мбит/с каждый.

2. Для FDM можно проанализировать загрузку различных частотных диапазонов, выделенных в сети, и сравнить объем данных, передаваемых в каждом диапазоне.

Предположим, у нас есть следующие протоколы с соответствующими требованиями к полосе частот:

1. Аналоговая телефония:
 - Требуемая полоса частот: от 300 Гц до 3.4 кГц
2. Цифровое видео:
 - Требуемая полоса частот: от 4 МГц до 8 МГц
3. Цифровые данные:
 - Требуемая полоса частот: от 10 МГц до 20 МГц

Нам нужно распределить доступную полосу частот так, чтобы каждый протокол получил достаточное количество частот для передачи данных.

Решение:

1. Распределение полос частот:

- Распределим доступную полосу частот от 0 до 20 МГц между протоколами в соответствии с их требованиями.

2. Вычисление ширины полосы для каждого протокола:

- Для каждого протокола вычислим ширину полосы в мегагерцах (МГц) с использованием следующей формулы:

Ширина полосы = верхняя граница - нижняя граница

3. Распределение частот:

- Распределим частоты в соответствии с вычисленными ширинами полос для каждого протокола.

Примерные вычисления:

1. Аналоговая телефония:

Ширина полосы = $3.4\text{kHz} - 0.3\text{kHz} = 3.1\text{kHz}$

2. Цифровое видео:

Ширина полосы = $8\text{MHz} - 4\text{MHz} = 4\text{MHz}$

3. Цифровые данные:

Ширина полосы = $20\text{MHz} - 10\text{MHz} = 10\text{MHz}$

4. Распределение частот:

- Аналоговая телефония: 0-3.1 кГц

- Цифровое видео: 3.1-7.1 МГц

- Цифровые данные: 7.1-17.1 МГц

Предположим радиосистему, которая использует FDM для передачи данных от 4 станций по одному каналу связи. Каждая станция передает данные на своей уникальной частоте. Если полоса пропускания канала составляет 100 кГц и каждой станции выделяется одинаковая полоса пропускания, то необходимо узнать, какова полоса пропускания каждой станции.

Полоса пропускания каждой станции можно вычислить, разделив количество станций на полосу пропускания канала. Подставляя наши значения, получаем:

Полоса пропускания станции = $\frac{100\text{kHz}}{4} = 25\text{kHz}$

Таким образом, каждой станции выделяется полоса пропускания 25 кГц для передачи данных.

3. Для WDM можно анализировать использование различных длин волн сигналов и рассчитать пропускную способность каждого канала на основе объема переданных данных.

Предположим, у нас есть следующие протоколы с соответствующими требованиями к скорости и пропускной способности:

1. Ethernet:

- Скорости: 10 Gbps, 40 Gbps, 100 Gbps

2. SONET/SDH:

- OC-48 (2.488 Gbps), OC-192 (9.953 Gbps)

3. Fibre Channel:

- 1 Gbps, 2 Gbps, 4 Gbps

Нам нужно распределить каналы WDM так, чтобы обеспечить оптимальное использование спектральных ресурсов и удовлетворить требования каждого протокола

Расчет полос пропускания:

- Для каждого протокола вычислим необходимую полосу пропускания (BW) в ТГц (терагерца) с использованием следующей формулы:

$BW = \text{Скорость передачи} / \text{Длина волны}$

- Например, для Ethernet скорости 10 Gbps и используя длину волны в 1550 нм, полоса пропускания будет:

$BW = \frac{10\text{Gbps}}{193.4\text{THz}} \approx 0.0517\text{THz}$

Распределение каналов WDM:

- Назначим каждому протоколу каналы WDM, используя расчетные значения полос пропускания.

- Предположим, у нас есть 40 каналов WDM. Мы можем распределить их следующим образом:

- Для Ethernet: 10 каналов на скорость 10 Gbps, 10 каналов на 40 Gbps и 5 каналов на 100 Gbps.

- Для SONET/SDH: 5 каналов на OC-48 и 5 каналов на OC-192.

- Для Fibre Channel: 5 каналов на 1 Gbps, 5 каналов на 2 Gbps и 5 каналов на 4 Gbps.

Примерные вычисления:

Ethernet:

Для скорости 10 Gbps:

$BW = \frac{10\text{Gbps}}{193.4\text{THz}} \approx 0.0517\text{THz}$

Для скорости 40 Gbps:

$BW = \frac{40\text{Gbps}}{193.4\text{THz}} \approx 0.2068\text{THz}$

Для скорости 100 Gbps:

$BW = \frac{100\text{Gbps}}{193.4\text{THz}} \approx 0.5171\text{THz}$

Подобные расчеты можно произвести и для остальных протоколов, применяя соответствующие значения скорости и длины волны.

Таким образом, мы можем эффективно распределить каналы WDM в соответствии с требованиями каждого протокола, используя вычисления полос пропускания и доступные ресурсы.

Предположим оптическую систему связи, которая использует WDM для передачи данных. Диапазон длин волн, который может использовать наш кабель, составляет 1530 нм-1565 нм. Это называется C-диапазоном для DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), который часто используется в оптических системах связи.

Если каждый канал использует 0.8 нм длины волны (что является типичным значением для DWDM), нужно узнать, сколько каналов мы можем поддерживать в нашей системе.

Мы можем вычислить это, используя следующую формулу:

Количество каналов = Ширина канала / Диапазон длин волн

Подставляя наши значения, получаем:

$$\text{Количество каналов} = \frac{1565\text{nm} - 1530\text{nm}}{0.8} = 43.75$$

Так как количество каналов должно быть целым числом, мы округляем его вниз до ближайшего целого числа. Таким образом, мы можем поддерживать 43 канала в нашей системе.

Этот пример показывает, как WDM позволяет максимизировать использование оптического спектра для передачи данных. Это особенно важно в современных оптических системах связи, где требуется передача большого количества данных.

В решенной задаче методы мультиплексирования (TDM, FDM, WDM) могут быть применены в контексте протоколов передачи данных для оптимизации использования ресурсов сети.

Временное доменное мультиплексирование (TDM): В этом примере, была рассмотрена система, которая использует TDM для передачи данных n -ого количества источников по одному каналу связи. Без мультиплексирования, нам потребовалось бы n отдельных каналов для передачи данных от каждого источника. Однако, благодаря TDM, мы можем передавать данные от всех источников по одному каналу, что позволяет более эффективно использовать доступные ресурсы канала.

Частотное доменное мультиплексирование (FDM): В этом примере, была рассмотрена радиосистема, которая использует FDM для передачи данных n -ого количества станций по одному каналу связи. Без мультиплексирования, каждой станции потребовался бы отдельный канал для передачи данных. Однако, благодаря FDM, каждая станция может передавать данные на своей уникальной частоте в рамках одного и того же канала, что также позволяет более эффективно использовать доступные ресурсы канала.

Мультиплексирование с разделением по длине волны (WDM): В этом примере, была рассмотрена оптическая система связи, которая использует WDM для передачи данных. Без мультиплексирования, каждому потоку данных потребовался бы отдельный волоконно-оптический кабель. Однако, благодаря WDM, мы можем передавать данные от всех потоков по одному волоконно-оптическому кабелю, что позволяет максимизировать использование оптического спектра и более эффективно использовать доступные ресурсы канала.

Таким образом, каждый из этих примеров демонстрирует, как мультиплексирование может помочь увеличить эффективность использования канала связи, позволяя передавать данные от нескольких источников по одному каналу. Это особенно важно в современных системах связи, где требуется передача большого количества данных. Решенная задача по анализу различных методов мультиплексирования может быть использована для иллюстрации применения этих методов в различных протоколах передачи данных и их влияния на эффективность и производительность сети.

Обсуждение

Исследование использования методов мультиплексирования (TDM, FDM, WDM) показало, что каждый метод обладает своими преимуществами и недостатками.

TDM обеспечивает равномерное распределение времени, но может стать неэффективным при большой нагрузке.

FDM эффективно разделяет частотный спектр, позволяя передавать данные с разными требованиями к полосе пропускания.

WDM значительно увеличивает пропускную способность, но требует специализированного оборудования.

Анализ данных с использованием различных методов мультиплексирования позволяет оптимизировать использование сетевых ресурсов и повысить эффективность сети.

Выбор подходящего метода мультиплексирования зависит от требований сети, таких как пропускная способность, задержка и стоимость реализации.

Новизна и оригинальность результатов исследования заключаются в следующем:

1. Количественная оценка эффективности мультиплексирования:

Анализ предоставляет конкретные числовые значения для эффективности различных методов мультиплексирования (TDM, FDM, WDM), что является оригинальным вкладом в эту область. Количественные данные позволяют точно оценить преимущества и недостатки каждого метода, облегчая обоснованное принятие решений о выборе метода для конкретного приложения.

2. Системная классификация и сравнение методов мультиплексирования:

Исследование систематически классифицирует различные методы мультиплексирования и представляет их характеристики в едином формате. Такой систематический подход облегчает сравнение и контрастирование методов, что является оригинальным вкладом, поскольку существующие исследования часто рассматривают методы мультиплексирования изолированно.

3. Практические рекомендации для оптимизации сети:

Результаты анализа могут быть непосредственно использованы для принятия решений по оптимизации использования сетевых ресурсов и улучшению производительности сети. Анализ предоставляет практические

рекомендации по выбору и внедрению подходящих методов мультиплексирования, что является оригинальным вкладом, поскольку он обеспечивает практическую ценность исследования.

4. Гибкость дизайна сети:

Анализ подчеркивает, что для оптимального решения может потребоваться комбинация различных методов мультиплексирования в зависимости от конкретной ситуации. Это обеспечивает гибкость и адаптируемость в дизайне сети, что является оригинальным вкладом, поскольку он признает разнообразие сетевых требований и предлагает решения, адаптированные к этим требованиям.

Заключение

Применение методов мультиплексирования в контексте протоколов передачи данных позволяет оптимизировать использование ресурсов сети, повысить эффективность передачи данных и обеспечить высокий уровень производительности сети.

Понимание и применение различных методов мультиплексирования в протоколах передачи данных позволяет сетевым инженерам и администраторам сети оптимизировать производительность и эффективность сети, а также повысить качество обслуживания для конечных пользователей. Это помогает обеспечить более стабильную и высокопроизводительную работу сетевой инфраструктуры в различных сценариях использования.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.144.144.2>

Conflict of Interest

None declared.

Review

International Research Journal Reviewers Community
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.144.144.2>

Список литературы / References

1. Krambeck D. An Intro to Multiplexing: Basis of Telecommunications / D. Krambeck. — 2015 — URL: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/an-intro-to-multiplexing-basis-of-telecommunications/> (accessed: 09.05.2024)
2. Alessandrini M. Looking to a future of multiplex cell engineering / M. Alessandrini. — 2023 — URL: <https://www.insights.bio/cell-and-gene-therapy-insights/journal/article/3075/Looking-to-a-future-of-multiplex-cell-engineering> (accessed: 09.05.2024) DOI: 10.18609/cgti.2023.199.
3. Довольнов Е.А.. Волновая фильтрация и мультиплексирование в волоконно-оптических системах передачи на основе высокоэффективных фотополимерных дифракционных решеток. / Е.А. Довольнов, В.В. Кузнецов, С.Н. Шарангович // Методы и устройства передачи и обработки информации.; — Вып. 3. — Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2003. — с. 104-115.
4. Митасов И.Ю. Исследование методов снижения пик-фактора сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием / И.Ю. Митасов, Р.Б. Саткенов // Электронный научно-методический журнал омского ГАУ. — 2018. — 4(15). — с. 2.
5. Shafiq M. Multiplexing techniques for future fiber optic communications with spatial multiplexing / M. Shafiq, F. Quanrun, C. Du et al. — 2024. — №330. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11082-023-05862-x> (accessed: 09.05.2024)
6. Sheldon Robert Multiplexing / Robert Sheldon, John Burke, Nemertes Research // TechTarget. — 2024. — URL: <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/multiplexing>. (accessed: 09.05.24)
7. Types of Multiplexing in Data Communications. — 2024. — URL: <https://www.geeksforgeeks.org/types-of-multiplexing-in-data-communications/> (accessed: 02.03.2024).
8. Demystifying Multiplexing Technologies : WDM, TDM and SDM. — 2023. — URL: <https://community.fs.com/article/fiber-optic-transmission-multiplexing-technique.html> (accessed: 02.03.2024).
9. Explain the Various Types of Multiplexing in Data Communication. — URL: <https://www.benchpartner.com/explain-the-various-types-of-multiplexing-in-data-communication> (accessed: 02.03.2024).
10. The Types of Multiplexing Explained. — 2022. — URL: <https://www.exitcertified.com/blog/the-types-of-multiplexing-explained> (accessed: 02.03.2024)

Список литературы на английском языке / References in English

1. Krambeck D. An Intro to Multiplexing: Basis of Telecommunications / D. Krambeck. — 2015 — URL: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/an-intro-to-multiplexing-basis-of-telecommunications/> (accessed: 09.05.2024)
2. Alessandrini M. Looking to a future of multiplex cell engineering / M. Alessandrini. — 2023 — URL: <https://www.insights.bio/cell-and-gene-therapy-insights/journal/article/3075/Looking-to-a-future-of-multiplex-cell-engineering> (accessed: 09.05.2024) DOI: 10.18609/cgti.2023.199.
3. Dovol'nov E.A.. Volnovaja fil'tratsija i mul'tipleksirovanie v volokonno-opticheskix sistemah peredachi na osnove vysokoeffektivnyh fotopolimernyh difraktsionnyh reshetok. [Wave filtering and multiplexing in fiber-optic transmission systems based on highly efficient photopolymer diffraction gratings.] / E.A. Dovol'nov, V.V. Kuznetsov, S.N. Sharangovich //

Methods and devices for transmitting and processing information.; — Issue 3. — Tomsk: Tomskij gosudarstvennyj universitet sistem upravlenija i radioelektroniki, 2003. — p. 104-115. [in Russian]

4. Mitasov I.Ju. Issledovanie metodov snizhenija pik-faktora signalov s ortogonal'nym chastotnym mul'tipleksirovaniem [Investigation of methods for reducing the peak factor of signals with orthogonal frequency multiplexing] / I.Ju. Mitasov, R.B. Satkenov // Electronic scientific and methodological journal of the Omsk State University. — 2018. — 4(15). — p. 2. [in Russian]

5. Shafiq M. Multiplexing techniques for future fiber optic communications with spatial multiplexing / M. Shafiq, F. Quanrun, C. Du et al. — 2024. — №330. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11082-023-05862-x> (accessed: 09.05.2024)

6. Sheldon Robert Multiplexing / Robert Sheldon, John Burke, Nemertes Research // TechTarget. — 2024. — URL: <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/multiplexing>. (accessed: 09.05.24)

7. Types of Multiplexing in Data Communications. — 2024. — URL: <https://www.geeksforgeeks.org/types-of-multiplexing-in-data-communications/> (accessed: 02.03.2024).

8. Demystifying Multiplexing Technologies : WDM, TDM and SDM. — 2023. — URL: <https://community.fs.com/article/fiber-optic-transmission-multiplexing-technique.html> (accessed: 02.03.2024).

9. Explain the Various Types of Multiplexing in Data Communication. — URL: <https://www.benchpartner.com/explain-the-various-types-of-multiplexing-in-data-communication> (accessed: 02.03.2024).

10. The Types of Multiplexing Explained. — 2022. — URL: <https://www.exitcertified.com/blog/the-types-of-multiplexing-explained> (accessed: 02.03.2024)