

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 681.7.068

Хтун Таук Вин

**Модификация оптических волокон для улучшения пропускной  
способности**

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра наук  
по специальности 7-06-0713-03 «Радиосистемы и радиотехнологии»

Научный руководитель

Михневич Светлана Юрьевна  
канд. физ.-мат. наук, доцент

Минск 2025

## **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время с активным развитием облачных вычислений, видео высокой четкости, Интернета вещей и систем связи 5G глобальный сетевой трафик резко увеличился. Однако передача по обычному одноканальному одномодовому оптическому волокну ограничена пределом Шеннона. В ближайшие несколько лет противоречие между вялым ростом оптических сетей и спросом на высокую пропускную способность на рынке будет обостряться, и это станет важной проблемой, требующей безотлагательного решения в отрасли оптической связи.

Чтобы решить проблему расширения оптической связи в будущем, признанным в отрасли техническим решением для увеличения пропускной способности одного волокна является использование технологии пространственного мультиплексирования. Многоканальное оптическое волокно, многомодовое оптическое волокно или многоканальное многомодовое оптическое волокно - это неизбежная тенденция развития передачи данных по оптоволоконному кабелю [1].

В рамках магистерской диссертации проведено исследование многоканального оптического волокна и его пропускной способности.

Магистерская диссертация выполнена самостоятельно, проверена в системе «Антиплагиат». Процент оригинальности соответствует норме, установленный кафедрой ИРТ. Цитирования обозначены ссылками на публикации, указанные в «Списке использованных источников».

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## **Актуальность темы магистерской диссертации**

С увеличением количества передаваемой и обрабатываемой информации, с повсеместным внедрением информационных цифровых систем вопрос об увеличении пропускной способности систем связи становится особенно актуальным. С целью увеличения пропускной способности разрабатываются новые форматы модуляции, новые типы волокон, активно применяется мультиплексирование. К настоящему времени уже созданы многоканальные волокна, однако они еще не стандартизированы, вследствие споров о расположении проводящих каналов, их количестве, размерах и влиянии друг на друга. Вместе с тем, с использованием многоканальных волокон встает вопрос о разработке или сочетании различных видов модуляции.

**Целью** диссертации является выбор оптимальной геометрии многоканальных оптических волокон с невзаимодействующими каналами и расчет количества передаваемой информации с использованием дополнительной модуляции.

**Задачей** исследования было провести выбор оптимальной геометрии многоканальных оптических волокон с невзаимодействующими каналами, обосновать выбранное расстояние между каналами. Во-вторых, обосновать различие частот используемых модуляций и обосновать возможность их использования. В-третьих, рассчитать объем передаваемой информации с дополнительной модуляцией в зависимости от размера сечения оптического многоканального волокна. Результаты данной работы докладывались на конференциях и отражены в тезисах докладов.

Полученные результаты могут быть применены для разработки сетей связи на основе многоканальных оптических волокон.

## **Связь работы с приоритетными научными направлениями**

Работа соответствует пункту 1 «Цифровые информационно-коммуникационные и междисциплинарные технологии, основанные на них производства» Указа Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156 «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021-2025 годы».

## **Личный вклад соискателя**

Соискателем опубликованы два тезиса и представлены доклады на двух конференциях, готовиться к печати статья.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность работы, отмечается новизна и кратко излагается содержание диссертации, а также объем и структура оптических волокон и основные научные результаты исследований.

В **первой главе** рассматриваются методы увеличения пропускной способности, виды оптических волокон, развитие передачи данных по оптическому волокну, виды многоканальных оптических волокон, пространственная эффективность многоканальных оптических волокон, виды модуляции, применяемые для оптических волокон.

В **второй главе** рассматривается многоканальное симметричное оптическое волокно, т.е. волокно, у которого размер и расстояние между каналами не изменяется с расстоянием. При изучении расположения каналов в волокне работает в предположении, что каналы не взаимодействуют друг с другом, для этого выбираем расстояние между каналами 30 мкм. Изучены возможные геометрии сечения оптического волокна с точки зрения пространственного расположения каналов. Показано, что треугольная мозаичная структура многоканального оптического волокна является оптимальной (см. рис.1) .

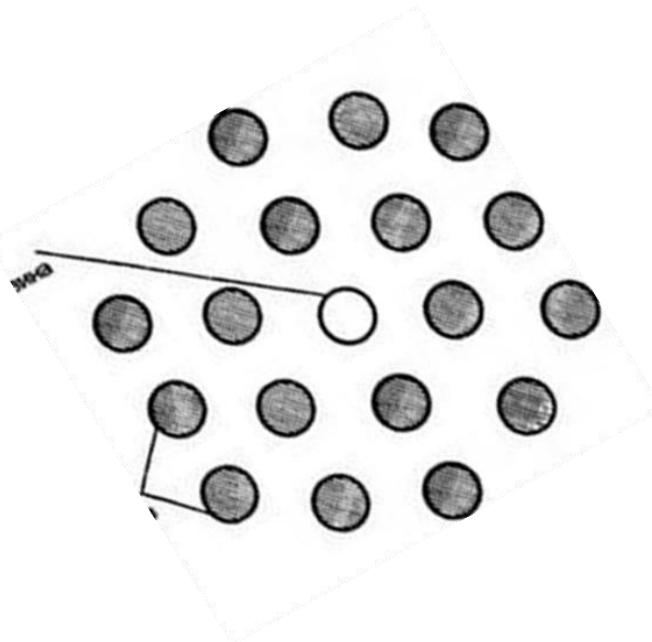


Рисунок 1 – Виды расположения волокон по треугольной мозаике

Количество каналов  $m$  можно рассчитать следующим образом:

$$m = 1 + 3 * (1 + N) * N, \quad (1)$$

где  $N$  – номер кольцевого слоя вокруг центрального волокна (в рассматриваемом случае имеет радиус 30 мкм).

Количество каналов в плоской геометрии для первых кольцевых слоем представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Количество каналов в плоской геометрии для первых кольцевых слоев

Номер слоя	0	1	2	3	4	5	6	7
Кол-во вершин	1	7	19	37	61	91	127	169

### Предлагаемая модуляция

Для увеличения пропускной способности предлагаем использовать следующую модуляцию.

Предположим, что каждый канал имеет пропускную способность 1 Гб/с и в нем используется двухуровневая амплитудная модуляция, частота которой соответственно порядка 2 ГГц, а длительность бита – 0,5 нс.

Каналы не взаимодействуют друг с другом и, предположим, волокно проложено без перекруток и изгибов. В этом случае длины оптических каналов можно считать одинаковыми, и сигналы распространяются с одинаковой скоростью.

Модулированный сигнал в каждом оптическом канале предлагаем использовать в качестве несущей и дополнительно промодулировать его двухуровневой амплитудной модуляцией на с частотой отличающейся от первой частоты модуляции на 1-2 порядка, т.е. 10-100 МГц. При этом дополнительная модуляция будет передавать сигнал, который в пространстве можно представить несколькими позициями, соответствующими номеру волокна. Например, 4 точками в пространстве можно задать следующие сигналы:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Фактически в волокне будет распространяться или единичный импульс или 0,5 по интенсивности. Импульс с интенсивностью 0,5 может быть получен как сочетанием 0 с основной модуляции и 1 с дополнительно, таки наоборот. Чтобы отличить эти две ситуации использует разницу частот модуляции на 1-2 порядка.

Многоуровневая модуляция используется в оптических линиях связи, но как показано в первой главе приводит к значительному уширению спектра сигналов и использованию дорогостоящего оборудования. В данном случае за счет разницы в частотах значительного уширения уровней не будет.

### **Пропускная способность многоканального оптического волокна с использованием дополнительной модуляции**

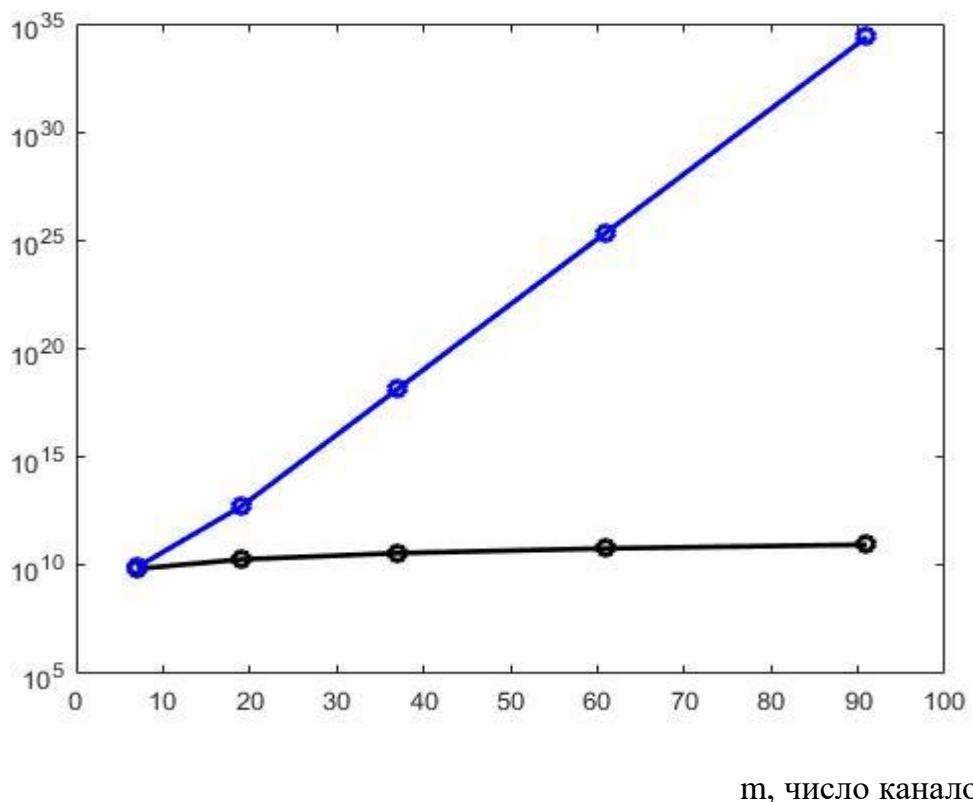
Предположим, что основная модуляция обеспечивает пропускную способность волокон  $I_0 = 1 \text{ ГГб/с}$ , а дополнительная  $10 \text{ Мб/с}$ . Тогда полная пропускная способность многоканального волокна будет определиться формулой

$$I = m * I_0 + I_s; \quad (3)$$

Количество информации, передаваемой дополнительной модуляцией зависит от количества оптических каналов:

$$I_s = 2^m * I_{s0}; (I_{s0} = 0.1 \text{ Mb}). \quad (4)$$

На рисунке 2 представлен график зависимости объема передаваемой информации для рассматриваемого многоканального оптического волокна в зависимости от количества каналов (соответственно номера слоев 1,2,3,4).

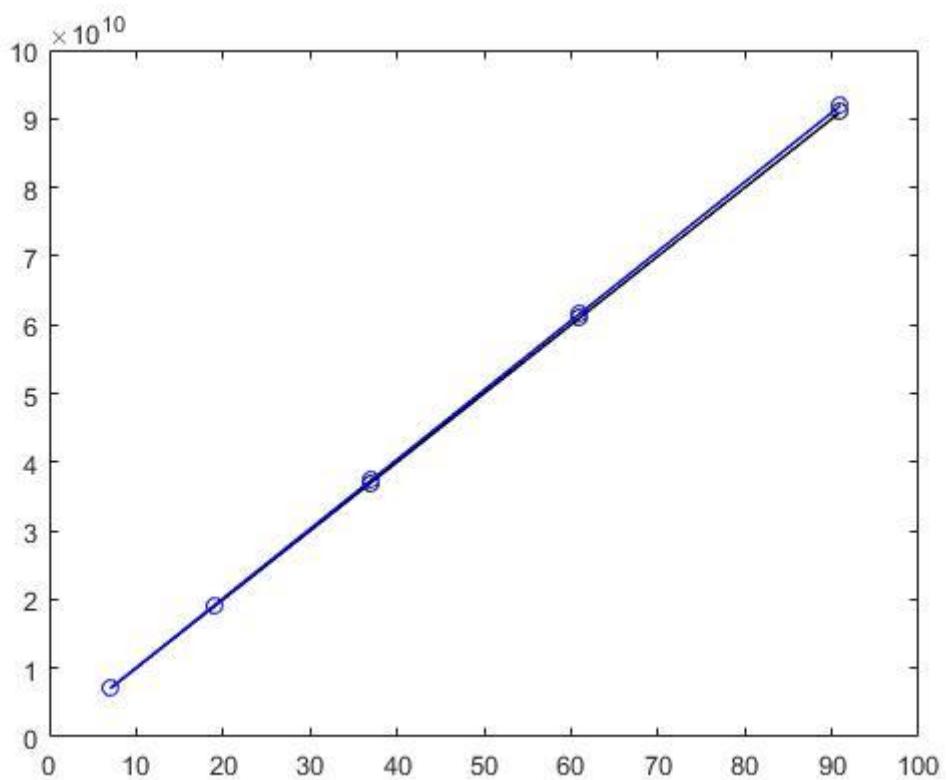


м, число каналов

Рисунок 2 Объем передаваемой информации в многоканальных оптических волокнах ( $I$ ) и с дополнительной модуляцией ( $I_s$ ).

Из рисунка видно, что не смотря на разницу модуляции в два порядка, уже в многоканальном волокне с двумя концентрическими каналами (что соответствует 19 каналам) достигается выигрыш в объеме передаваемой информации, при дальнейшем увеличении количества слоев этот выигрыш увеличивается практически в логарифмическом масштабе.

Если вести дополнительную низкочастотную модуляцию без учета пространственного расположения каналов, то практически нет увеличения объема передаваемой информации (см. рис. 3)



$m$ , число каналов

Рисунок 3 Объем передаваемой информации в многоканальных оптических волокнах ( $I$ ) и с дополнительной модуляцией ( $I_s$ ) без учета пространственного расположения каналов

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модификация оптических волокон представляет собой перспективное направление для увеличения пропускной способности телекоммуникационных систем. В магистерской диссертации рассмотрено многоканальное оптическое волокно с невзаимодействующими каналами.

Показано, что треугольная мозаика является оптимальной с точки зрения экономии пространства, геометрией сечения оптического волокна, при условии, что все сердечники находятся на равном расстоянии друг от друга. Рассчитана пропускная способность такого волокна в зависимости от количества слоев.

Проанализированы различные виды модуляции, используемые в оптических волокнах, их преимущества и недостатки. В предположении, что многоканальное оптическое волокно проложено без изгибов и скруток предложено помимо основной модуляции, используемой в каналах связи использовать дополнительную низкочастотную модуляцию с учетом пространственного расположения волокон. То есть для дополнительной модуляции в качестве несущей использовать промодулированные сигналы в каналах связи. Показано, что при этом уже со второго слоя достигается значительный выигрыш в передаче информации при учете пространственного расположения сигналов. Без учета пространственного расположения сигнала выигрыша в объеме передаваемой информации нет.

Обосновано необходимое значительное (1-2 порядка) отличие частот модуляций в каналах связи и дополнительной модуляции.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых видов оптических волокон.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**

1. Вин, Хтун Таук Увеличение пропускной способности многоканальных оптических волокон / Хтун Таук Вин // 61-ая научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». Секции «Информационные радиотехнологии», 21 – 25 апр. 2025 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2025.

2. Вин, Хтун Таук Увеличение пропускной способности многоканальных оптических волокон / Хтун Таук Вин // Материалы XXI Научно-технической конференции «Новые информационные технологии в телекоммуникациях и почтовой связи», (Республика Беларусь, Минск, 13-14 мая 2025 г.) /редкол.: А.О.Зеневич [и др.]. – Минск, Белорусская государственная академия связи, 2025. – С.86.