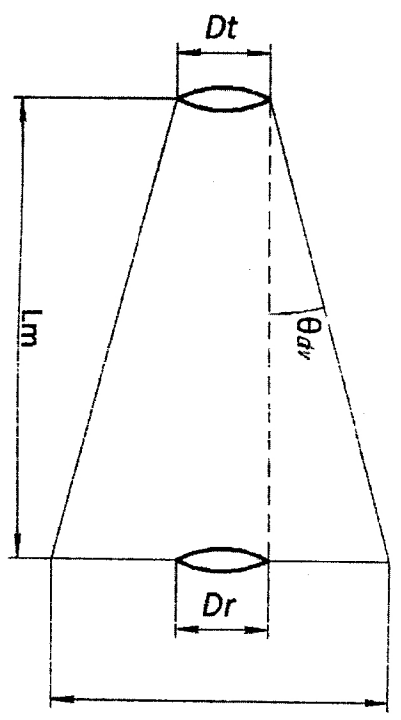


6041

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. В.Ф. УТКИНА

**ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРНОЙ
ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ АРГОЛКК МЛ-С**

Методические указания
к лабораторной работе



Рязань 2021

УДК 621.396.67

Исследование атмосферной оптической линии связи ArtoLink M1-G: методические указания к лабораторной работе / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. соот. Л.В. Аронов. Рязань, 2021. 12 с.

Содержат описание лабораторной работы. Продолжительность работы 4 часа, домашняя подготовка к работе – 4 часа.

Предназначены для проведения лабораторных работ в лаборатории устройств СВЧ и антенн имени лауреата Государственной премии, заслуженного деятеля науки и техники, доктора технических наук, профессора Василия Ивановича Поповкина при изучении дисциплины «Оптические системы передачи».

Табл. 2. Ил. 5. Библиогр.: 8 назв.

Оптические системы передачи, атмосферные оптические линии связи (АОЛС), лазерная связь

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра РУС Рязанского государственного радиотехнического университета (зав. кафедрой проф. С.Н. Кириллов)

Исследование атмосферной оптической линии связи ArtoLink M1-G

Составитель, Аронов Леонид Вячеславович

Редактор Р. К. Мангутова
Корректор С. В. Макушина

Подписано в печать 26.06.2021. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,75.

Тираж 50 экз. Заказ 39794.

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Лабораторная работа

ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ ARTOLINK M1-G

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

С помощью атмосферных оптических линий связи (АОЛС) организовуется соединения типа «точка-точка». АОЛС состоит из пары идентичных приемопередаточных модулей, расположенных в пределах прямой видимости относительно друг друга. Кроме того, в линию встроены дополнительные устройства, отвечающие за питание, мониторинг и настройку приемопередаточных модулей (ППМ) и подключение к каналу обслуживающему оборудованию. В основе технологии лежит передача данных модулированным инфракрасным излучением через атмосферу. В качестве передатчика используется, как правило, полупроводниковый лазер. Входной электрический сигнал поступает в ППМ, в котором осуществляются промежуточные его кодирование и модуляция оптического излучения, которое фокусируется оптической системой передатчика в узкий лазерный луч и передается в атмосферу.

На принимающей стороне оптическая система ППМ фокусирует оптический сигнал на высокочувствительный фотодиод (или лазерный диод), который преобразует оптическое излучение в электрический сигнал. При этом чем шире электрическая полоса сигнала, тем больше скорость передачи информации. Принятый сигнал демодулируется и преобразуется в сигналы выходного интерфейса.

Передатчик. Назначение оптического передатчика – формирование исходного сигнала с заданными параметрами модуляции и выходной мощностью. Структура оптического передатчика показана на рис. 1.

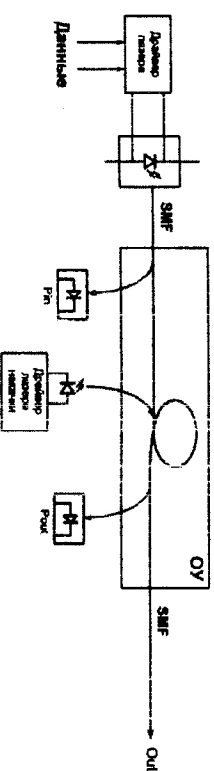


Рис. 1. Структура оптического передатчика

Поскольку в оптическом диапазоне практически отсутствует проблема электромагнитной совместимости и ограничения на ширину

спектра сигнала, то обычно применяется самый простой вид модуляции — амплитудная (модуляция по интенсивности). Этот тип модуляции называется ООК (on-off keying).

Передачик представляет собой обычную «мигалку», включенное состояние которой соответствует «1», а выключенное «0». Такой вид модуляции применяется еще на заре развития электросвязи в системах телеграфирования. Коренное отличие современных систем состоит в скорости модуляции. Для передачи потока 10 Гбит/с требуется генерация импульсов с шириной 100 пс и стабильностью фронтов не хуже 20 пс. Эта задача сегодня может быть решена прямой модуляцией тока лазерного диода. Для более высоких скоростей необходимо применить внешние оптические модуляторы.

Генерирование столь коротких импульсов может быть осуществлено только на маломощных генераторах. Типичная мощность волоконных передатчиков лежит в диапазоне 0,5-2 мВт. Для увеличения мощности применяются оптические усилители (ОУ или ОА — optical amplifier), которые бывают полупроводниковыми или волоконно-оптическими. Последний тип усилителей имеет большую выходную мощность и лучше подходит для использования в АОЛС. Кроме того, ОУ выключаются в интегральном волоконном исполнении, не требуют юстировки, не боятся пыли и демонстрируют надежность в сотни тысяч часов наработки на отказ.

В качестве задающего генератора используется полупроводниковый лазер с прямой модуляцией тока накачки. Для этого используется специализированная микросхема драйвера лазерного диода. Она обеспечивает оптимальные режимы работы диода, включая задание нужной величины тока смещения, уровня тока модуляции, а также компенсацию температурных дрейфов.

Примерная классическая структурная схема оптического приемника для применения приведена на рис. 2.

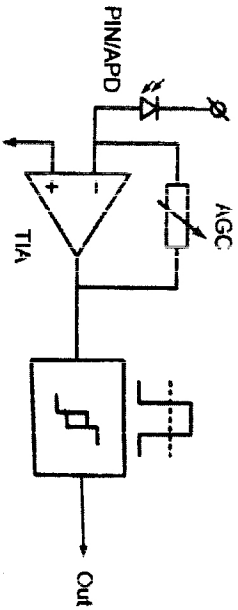


Рис. 2. Структура оптического приемника для высокоскоростной передачи информации

Приемник может быть выполнен на PIN или APD фотодиоде. Для диапазона длин волн 1,55 мкм материал, из которого выполняется собственно фотодиод, — это InAsGa. Спектральная чувствительность этого материала лежит в диапазоне от 1200 до 1700 нм. Скоростные свойства определяются, прежде всего, размером фоточувствительной площадки. Для скорости 10 Гбит/с ее диаметр составляет от 30 до 50 мкм. Это меньше диаметра применяемого волокна — 62 мкм. Для согласования размеров светового поля и площадки требуется специальная оптическая система.

В качестве непосредственного преобразователя свет-ток (О/Е) используется схема классического приемника. Но на его входе добавляется предварительный оптический усилитель (рис. 3).

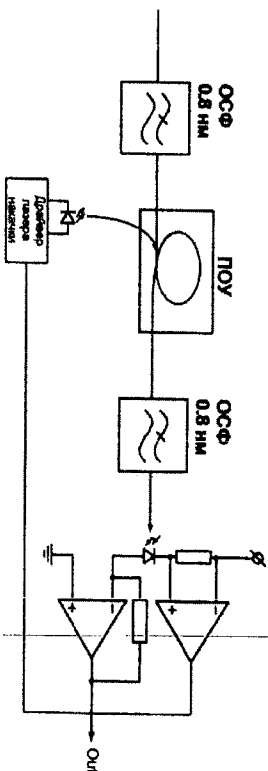


Рис. 3. Структура оптического приемника с предварительным ОУ

Предварительный ОУ обеспечивает дополнительное приращение оптического сигнала на 20-25 дБ. Усиление зависит от мощности оптической накачки и может быть легко отрегулировано путем введения обратной связи по току фотодиода. Пределная чувствительность такой схемы S зависит от шумов предварительного усилителя и описывается выражением

$$S = -58 + NF + OSNR, [\text{дБм}], \quad (1)$$

где NF — шум-фактор усилителя, OSNR — оптическое отношение сигнал шум, которое определяется в заданной оптической полосе. Для однододовых ОУ OSNR составляет 33,5 дБ, для многододовых ОУ — 13-15 дБ.

В интересах улучшения OSNR в схему введены два оптических фильтра. Уровень ошибок BER=10⁻¹² соответствует OSNR 17 дБ, для BER=10⁻⁹ достаточно 15 дБ. Источником шума в приемнике для такой схемы являются биения между спонтанным излучением усилителя и сигналом, и по своему характеру этот шум приближается к дробовому. Данный тип шума эффективно преодолевается с помощью избыточного

кодирования. Оно увеличивает требуемую электрическую полосу канала на 710 %, но дает выигрыш по эквивалентной чувствительности в 6-7 дБ.

ЦЕЛИ РАБОТЫ

1. Изучение теоретических основ АОЛС.
2. Приобретение навыков расчета параметров систем АОЛС.
3. Исследование влияния атмосферы на работу АОЛС.
4. Приобретение навыков работы с оборудованием АОЛС Atolink M1-GE.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Описание экспериментальной установки (рис. 4). Состоит из двух идентичных приёмопередатчиков лазерной модуль, двух блоков интерфейсов и комбинированных кабелей, соединяющих лазерный модуль и блок интерфейсов. Блок интерфейсов выступает в качестве источника питания для лазерного модуля и служит для подключения каналообразующего оборудования и коммутации потоков передачи информации.

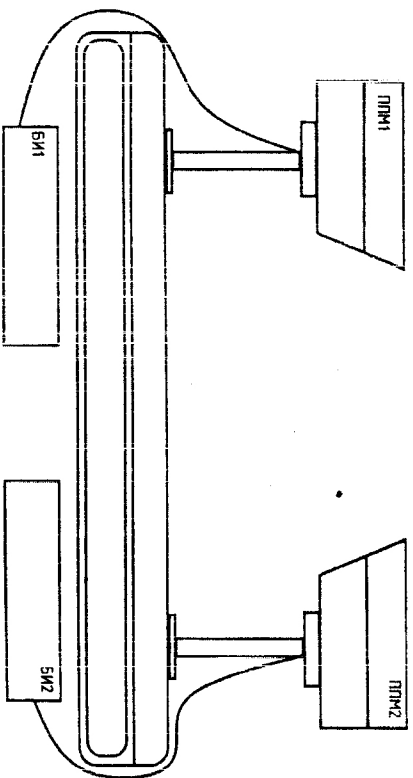


Рис. 4. Структурная схема экспериментальной установки

ПММ имеет приёмопередатчую оптическую систему, встроенную систему автоматической корректировки оси диаграммы направленности (ОДН), оптический усилитель (ОУ).

Для работы ПММ используется две длины волны и соответственно реализовано деление на служебный канал (СЛК), который вы-

ступает в качестве сервисного и отвечает за точное наведение и передачу служебных данных о состоянии удалённого терминала, и измерительный информационный канал (ИК), который используется для прокождения высокочастотных сигналов. Служебный канал работает на длине волны 785 нм. Предназначен для организации работы системы автоматической подстройки осей диаграмм направленности и точного позиционирования терминалов установки друг относительно друга на различных дистанциях.

Блок интерфейсов (БИ) обеспечивает питание лазерного модуля, обмен сигналами телеконтроля и телеуправления с внешним коммутатором через сервисный протокол и подключение каналообразующего оборудования. Каналообразующее оборудование подключается к SFR+, расположенному на блоке интерфейсов, с помощью любых SFR+ модулей, поддерживающих стандарт 10GBASE. Разработана плата интерфейса с возможностью подключения до 4-х приёмопередатчиков на основе стандартных SFR+ модулей с пропускной способностью до 10 Гбит/с каждый.

Параметры оптического волокна, присоединенного к источнику излучения: диаметр сердцевинны $D_1=8$ мкм, числовая апертура $NA_1=0,12$, показатель преломления сердцевинны $n_1=1,475$.

Оптическое волокно, присоединенное к фотоприемнику: $NA_2=0,27$; $D_2=62,5$ мкм; $n_2=1,475$.

Эти волокна оптически соединены торцами между собой, при этом оптическое волокно, соединенное с источником излучения, оптически соединено с боковой поверхностью оптического волокна, соединенного с фотоприемником, под углом α , который определяется из условий:

$$\sin \alpha = \frac{NA_2}{n_2} = \frac{NA_1}{n_1},$$

отсчитываемого от оптического волокна; при этом торец третьего волокна, оптически соединенный с приёмопередатчей моностабильной оптической системой, отшлифован под углом β к поверхности, перпендикулярной к своей оси при, условии, что

$$\frac{1}{n_2} - \frac{NA_2}{n_2} > \sin \beta > \frac{NA_1}{n_2},$$

где $D_2 > D_1$ и $NA_2/n_2 > NA_1/n_1$.

Данное излучение, выходящее из волокна, характеризуется числовой апертурой NA , которая равна

$$NA = \sin \gamma;$$

где γ — половинный угол расходимости излучения, вышедшего из оптического волокна в воздух.

Соответственно числовая апертура излучения внутри волокна равна $\sin \gamma / n$, где n — показатель преломления сердцевинны оптического волокна.

Вывод условий для данного согласования показан на рис. 5.

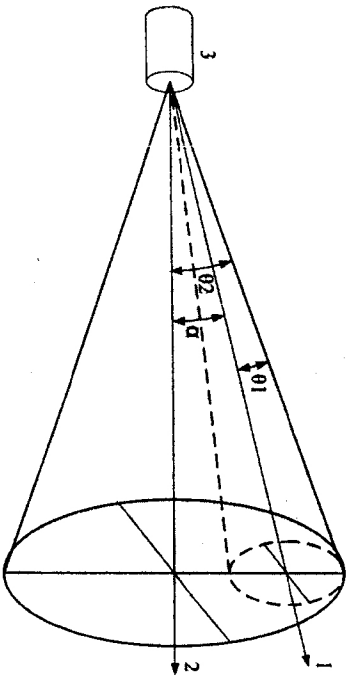


Рис. 5. Условие для угла ввода входящего излучения

На рис. 5 1 — оптическая ось вводимого излучения; 2 — оптическая ось многомодового оптического волокна; 3 — многомодовое волокно; α — угол между оптической осью вводимого излучения и оптической осью многомодового волокна; θ_1 — угол расходимости вводимого излучения, соответствующий числовой апертуре оптического волокна 4; θ_2 — угол расходимости излучения, соответствующий числовой апертуре многомодового оптического волокна 2.

Углы θ_1 и θ_2 связаны соотношениями с числовыми апертурами оптических волокон следующими выражениями:

$$\sin \theta_1 = \frac{NA_1}{n_1},$$

$$\sin \theta_2 = \frac{NA_2}{n_2}.$$

Поскольку должно выполняться условие полного внутреннего отражения, следует, что угол между оптической осью вводимого излучения и оптической осью многомодового волокна должен соответствовать условию, чтобы конус оптического вводимого излучения находился внутри конуса допустимых углов распространения излучения в многомодовом волокне. Из рис. 5 это сводится к условию

$$\alpha = \theta_2 - \theta_1 \text{ или } \sin \alpha < \frac{NA_2}{n_2} - \frac{NA_1}{n_1}.$$

Угол β должен соответствовать условию, когда излучение, распространяющееся внутри волокна с максимально допустимым углом, соответствующим числовой апертуре NA_2/n_2 при отражении от шинфованного торца на двойной угол β , не находится внутри конуса с углом, соответствующим числовой апертуре NA_1/n_1 . Таким образом, на угол β накладывается условие

$$\frac{1}{n_2} - \frac{NA_2}{n_2} < \sin \beta < \frac{NA_2}{n_2}.$$

Для многомодового волокна с указанными ранее параметрами $0,495 > \sin \beta > 0,182$ или $29,7^\circ > \beta > 10,5^\circ$.

Для оптически полированных поверхностей доля рассеянного света составляет 0,1-0,01 % от мощности падающего на поверхность излучения. Мощность приемника (P_r) в благоприятных погодных условиях с метеорологической дальностью L , находящейся в пределах от 18,1 до 20 км, определяется выражением

$$P_r = \frac{D^2 \cdot P_t}{\alpha^2 \cdot L^2 \cdot 2} \cdot K \gamma, \quad (2)$$

где D — световой диаметр оптической системы, м; $P_t = 3$ мВт — выходная мощность передатчика; $K=0,4$ — сквозное пропускание оптической систем; γ — половинный угол расходимости излучения, вышедшего из оптического волокна в воздух, рад; α — угол между оптической осью вводимого излучения и оптической осью многомодового волокна, рад. Выражение для определения мощности на приемнике (P_r) при воздействии мешающих погодных явлений имеет вид

$$P_r = P_t \cdot \frac{d_1^2}{[d_1 + (D \cdot R)]^2} \cdot 10^{(-\alpha \cdot R / 10)}, \quad (3)$$

где R — дистанция, км; d_1 — диаметр апертуры передатчика, м; d_2 — диаметр апертуры приемника, м; $D = 0,15$ — расходимость излучения, мрад (по уровню $1/e$ для гауссовских пучков; FWHM для прямоугольного распределения), α — коэффициент згухания в атмосфере, дБ/км, $P_t = 3$ мВт — выходная мощность передатчика.

В уравнении (3) мощность на приемнике пропорциональна мощности излучения и площади приемной апертуры и обратно пропорциональна квадрату расходимости пучка излучения и квадрату длины линии связи.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

Для эффективной эксплуатации оборудования необходимо проводить расчет энергетического бюджета линии. К работе непосред-

ственно на лабораторной установке допускаются только студенты, выплывшие вычисления и ознакомившиеся с теоретическими сведениями об АОЛС и параметрах ППМ.

Коэффициент атмосферного затухания – неконтролируемый параметр окружающей среды и не зависящий от длины волны в тяжелых погодных условиях. Принимаемая мощность экспоненциально зависит от произведения данного коэффициента на расстояние и в реальной атмосфере для систем с требуемым уровнем доступности 99,9% этот фактор в уравнении оказывает наибольшее влияние. В табл. 1 содержатся исходные данные для предварительного расчёта.

Таблица 1. Исходные данные

№ варианта	Погодные условия		Затухание, дБ/км
	Ясная погода	Облачность	
1	Смог	10	1
2	Густой туман	40	320
3	Легкий туман	20	40
4	Облачность	380	20
5	Густой туман	70	380
6	Ясная погода	0	70
	Облачность	350	0
	Смог	16	350
	Легкий туман	22	16
	Ясная погода	3	22

Задание:

1. Определить мощность приемника для дистанции 0,5; 1; 1,5 км при наличии смога, легкого тумана (туман 1), густого тумана (туман 2) соответственно номеру бригады. Построить график зависимости мощности от дальности.

2. Рассчитать уровень геометрических потерь для каждой дистанции в эксперименте по выражению (4) и построить график, иллюстрирующий эту зависимость:

$$L_r = \frac{d_{\text{прием}}}{d_{\text{перед}} + R \cdot d}, \quad (4)$$

где $Q=0,15$ - угол расходимости излучения, мрад; R – расстояние между приемной и передающей апертурами, м.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

1. Включить интерфейс модули М1-GE-2.

2. Поместить препятствие (например, тетрадный лист) между оптическими модулями и по наличию звука убедиться в их работоспособности. (Наличие звука свидетельствует об исправности системы наведения.)

3. На ПК запустить программное обеспечение Telesp2G.jar. Во вкладке «Состояние» проверить состояние системы наведения.

3.1. Перейти во вкладку «Поддержка». Определить мощность сигнала на передающем и приемном оптических модулях. Зафиксировать показания.

3.2. Установить на швеллере между приемным и передающим оптическими модулями стекла, имитирующие естественные помехи: смог, легкий туман, густой туман.

3.3. Снять стекла.

3.4. Провести последовательную установку стекол, имитирующих расстояние. Стекла устанавливаются на швеллере между приемным и передающим оптическими модулями.

Результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица 2. Результаты измерений

L, м	1.2	500	1000	1500
P _{пр} , мкВт	1. Без имитации погодных условий			
	2. Режим «Туман 1»			
	3. Режим «Туман 2»			
	4. Режим «Смог»			
P _{пр} , мкВт				
P _{пр} , мкВт				

4. После окончания эксперимента выключить ПК и интерфейсные модули М1-GE-2.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

По данным табл.2 построить график зависимости мощности приемника от расстояния при различных погодных условиях, исследованных в эксперименте.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Схема экспериментальной установки.
3. Предварительные расчёты.
4. Результаты измерений в виде таблиц и графиков.
5. Выводы.

На усмотрение преподавателя допускается иметь один отчет на бригаду.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими достоинствами и недостатками обладают атмосферные оптические линии связи по сравнению с волоконно-оптическими?
2. Сравните достоинства и недостатки атмосферной оптической линии связи и радиоканалов передачи данных. Перечислите сферы их применения.
3. От чего зависит предельная чувствительность приёмника атмосферной оптической линии связи?
4. Изобразите структуру оптического приёмника с предварительным ОУ.
5. Изобразите структуру оптического передатчика.
6. Каким образом погодные условия оказывают влияние на работу АОЛС?
7. Что представляют собой потери мощности на рассеяние и поглощение?
8. Что такое геометрические потери? От чего они зависят?
9. Какие шумы сопровождают приём оптических сигналов?
10. Какие виды фотодетекторов используются в атмосферной оптической линии связи? Назовите их достоинства и недостатки.
11. Виды модуляции лазерного излучения. Методы модуляции оптических сигналов.
12. Фоновый оптический шум и его особенности.
13. Оптимальный выбор длины волны оптического передатчика атмосферной оптической линии связи.
14. Требования к системе наведения атмосферной оптической линии связи. Точность наведения.
15. Лазеры оптических систем передачи информации. Оптимальный выбор лазера атмосферной оптической линии связи.
16. Перечислите внутренние и внешние параметры, влияющие на работу АОЛС. Оцените их влияние.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов С. Система оптической связи в подводной среде [Текст] / С. Кузнецов, Б. Огнев, С. Подляков // Первая миля. — 2014 — № 2. — С. 46-51.
2. Прагт В.К. Лазерные системы связи / пер. с англ. под ред. А.Г. Шереметьева. [Текст]. — М.: Радио и связь, 1993. — 232 с.

3. Кириллов С.Н. Пропускная способность подводного оптического канала передачи информации с кодом импульсной модуляцией при интенсивности [Текст] / С. Н. Кириллов, Л. В. Аронов // Вестник РГРТУ. — 2020. — № 4 (74). — С. 3-13. DOI: 10.21667/1995-4565-2020-74-3-13

4. Кириллов С. Н. Разработка модели распространения оптического сигнала в водной среде для подводных систем передачи информации [Текст] / С. Н. Кириллов, С. А. Балок, С. Н. Кузнецов, А. С. Есенин // Вестник РГРТУ. — 2012. — №2. — С. 3-8.

5. Аронов Л.В. Геометрические потери в подводном канале передачи информации на основе источника когерентного оптического излучения [Текст] / Л. В. Аронов // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2019 : сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 10 т. Т.1 / под общ. ред. О.В. Милозорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2019; Рязань. – 206 с. – С. 118-121.

6. Bloom S. Understanding the performance of free-space optical [Текст] / S. Bloom, E. Kolevaar, J. Schuster, H. Willebrand // Journal of optical networking / Vol.2. No. 6, 2003. P. 178-200.

7. Шереметьев А. Г. Статистическая теория лазерной связи [Текст] / А. Г. Шереметьев. – М. : Связь, 1971. – С. 264

8. Кириллов С.Н. Обнаружение оптического сигнала на фоне шумов фотодетектора [Текст] / С.Н. Кириллов, Л.В. Аронов // Актуальные проблемы современной науки и производства: материалы III Всероссийской научно-технической конференции. – 2018. – С. 188-191.

Автор настоящих методических указаний выражает благодарность компании АО «Мостком» и лично Олегу Борису Игоревичу за предоставленную кафедру радиотехники и связи АОЛС Artolink М1-С, а также за техническую поддержку.

Автор выражает благодарность Краковской Марии Изоревне, студентке группы 018М, за активное участие в подготовке данных методических указаний и Матильдиной Елене Олеговне, студентке группы 818 за помощь в сборке и установке держателя стекла на лабораторном стенде.

МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ИСТОЧНИКАМИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В процессе выполнения лабораторной работы используется излучение полупроводникового лазера ИК диапазона (1550 нм), невидимого человеческого глазу. Данное излучение является опасным и вредным фактором, поэтому работа с ним требует соблюдения определенных мер безопасности.

МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ

1. В установке применен лазер; по степени опасности генерируемое излучение относится к классу 1.
2. В рабочей зоне установки запрещается использовать приборы и предметы с зеркальными поверхностями. Перед началом работы необходимо убедиться в исправности установки и отсутствии опасности попадания лазерного излучения вне выделенной зоны.
3. Персонал, работающий с лазерными установками, обязан пользоваться необходимыми средствами индивидуальной защиты в соответствии с требованиями, определяемыми классом лазерной опасности. Глаза сотрудников должны быть защищены масками или очками.
4. О всех нарушениях в работе установки и других отступлениях от нормального режима работы необходимо немедленно сообщить преподавателю или ответственному за лабораторию.

ЗАПРЕЩАЕТСЯ

1. При работе с лазерным излучением:
 - смотреть навстречу первичному и зеркально отраженному лучу;
 - оставлять бесконтрольным пространство, в котором производятся манипуляции;
 - работать без защитных очков в зоне излучения;
 - проводить ремонтные и наладочные работы при подключенной к сети установке.
2. При эксплуатации установки:
 - производить замену сетевых предохранителей, соединения и разделения кабелей при включенной в сеть установке;
 - наблюдать прямое или зеркальное отражение лазерного излучения;
 - работать на завешено неисправной установке;
 - оставлять установку без присмотра во включенном состоянии;
 - производить включение лазера при расстыкованном разъеме излучателя источника питания.