

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ

УДК: 535.628.373.8

ПЕРЕДАЧА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРНЫЕ ТРАССЫ**В. А. Хан**, профессор Томского политехнического университета (ТПУ), д.т.н.**В. Ф. Мышкин**, профессор ТПУ, д.ф.-м.н.; gos100@tpu.ru**В. Н. Ленский**, начальник учебной части военной кафедры ТПУ**В. А. Борисов**, зам. начальника военной кафедры ТПУ**Б. Ж. Кемельбеков**, начальник Центра эксплуатации магистральной сети АО «Транстелеком» (Казахстан), д.т.н.

Ключевые слова: лазер, моды резонатора, биения, интерференционный поток, импульс, коэффициент ослабления, атмосферная трасса, дальность передачи, аэрозоль, турбулентность.

Введение. Обеспечение надежности систем связи — комплексная задача, для решения которой в числе прочих факторов необходимо использовать методы оперативной локализации и устранения неисправностей, возникающих в ходе эксплуатации аппаратуры. Важная роль отводится методам передачи оптического излучения, способствующим лучшему прохождению сигнала по каналу связи через участки трассы, ослабляющие оптическое излучение.

Разработка и создание высокоскоростных открытых оптических каналов связи выводят задачу изучения распространения коротких импульсов через атмосферный аэрозоль (туман, осадки) в разряд актуальных. В качестве носителей информации могут быть использованы лазерные импульсы длительностью менее 1 нс.

Цель данной работы — исследовать возможность и оценить эффективность передачи потока оптического излучения через ослабляющие участки открытых оптических каналов связи.

Формирование коротких импульсов. Известно, что короткие импульсы можно формировать из множества волн путем фазовой синхронизации и интерференции, а также в нелинейной среде за счет дисперсии скоростей волн разных частот. Способ формирования коротких импульсов за счет интерференции компонент представлен, в частности, в [1], а поведение таких импульсов в нелинейной среде рассматривается в [2 и 3].

Явления, обусловленные межмодовыми биениями, приводят к формированию импульсного излучения. Так, импульсы лазерного излучения длительностью 1 нс и менее формируются за счет синхронизации модовых составляющих и их когерентного взаимодействия на трассе распространения [4].

Из множества непрерывных модовых составляющих можно сформировать импульсно-периодические оптические импульсы, период следования которых однозначно определяется спектральным составом лазерного излучения. Вид оптических импульсов, формируемых с помощью 10 длин волн равных амплитуд с центральной частотой $f_0 = 5,637362 \cdot 10^{14}$ Гц с межмодовым интервалом $\Delta f = 5$ МГц, представлен на рис. 1. Формируются импульсы с частотой следования 5 МГц и полушириной $\Delta t = 20$ нс.

Используя частотную модуляцию (чирпирование), можно сформировать импульсы с одинарным и двойным периодом следования. При этом последовательность импульсов будет восприниматься фотоприемником как наличие (или отсутствие) в заданные моменты времени импульса излуче-

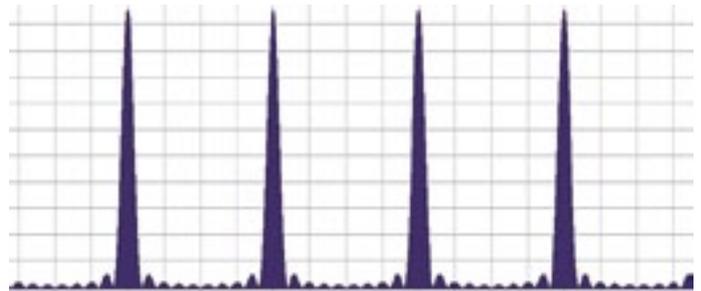


Рис. 1

ния. Таким образом, за счет чирпирования частоты спектра лазерного излучения можно формировать двоичный код для передачи информации.

Отметим, что изучение вопросов, связанных с распространением импульсов лазерного излучения длительностью менее 1 нс через турбулентную атмосферу и аэрозольные системы, ведется с 90-х годов прошлого столетия и продолжается по сей день. Известны и результаты исследований выделения энергии за время действия импульса (пробой) [5], филаментации (перераспределение энергии по сечению пучка) [6] и взаимодействия с аэрозольными частицами [7].

Вместе с тем подробный анализ этих исследований и проведенные расчеты показывают, что у методов формирования наносекундных и более коротких импульсов есть принципиальное отличие, связанное с использованием межмодовых биений. Эти биения представляют собой взаимодействие (интерференционный эффект) смещенных на межмодовый интервал спектральных составляющих излучения.

Передача информационного сигнала с помощью интерференционного потока. В настоящее время для объяснения интерференционных явлений используется термин «интерференционный поток». В [8] показано, что интерференционный поток двух потоков электромагнитных волн осциллирует в направлении их распространения. Однако происходящие процессы и возможности передачи информационного сигнала с помощью интерференционного потока изучены недостаточно.

Известно также, что в интерференционном поле, сформированном в ослабляющей среде, потери энергии оптического излучения происходят лишь в области светлых полос [9]. Шаг интерференционной картины составляет $a = 2\pi|k|^{-2}$, а скорость перемещения интерференционных полос $v = \Delta\omega|k|^{-2}$; $k = k_1 - k_2$ — величина векторная, где k_1 и k_2 — волновые векторы интерферирующих лучей [10]. При этом максимумы интерференционной картины будут перемещаться с групповой скоростью.

Волновые векторы отдельных спектральных компонент параллельны. Поэтому для спектральных компонент (необ-

ходимых для формирования коротких импульсов) с межмодовым интервалом 10 МГц групповая скорость в воздухе вдали от линий поглощения совпадает с фазовой (скорость света). Для двух интерферирующих волн огибающая суммарной волны описывается синусоидой, а при увеличении числа составляющих происходит локализация энергии волн в узкой области вблизи максимума интерференционной полосы.

Биения потоков излучений на разных частотах могут наблюдаться как в резонаторе лазера, так и на трассе распространения. Межмодовый интервал резонатора можно определить из соотношения $\Delta f = c(2L)^{-1}$, где L — длина резонатора; c — скорость света. Теоретическая полуширина линии генерации лазера в одночастотном режиме (ширина линии одной модовой составляющей) $\Delta\nu = 2\pi h\nu p^{-1}(\Delta\nu_p)^2$, где p — мощность лазера; $\Delta\nu_p = \nu/Q$ — полуширина полосы пропускания резонатора ($Q = \frac{2\pi L}{\lambda(1-r_1r_2)}$ — добротность резонатора; r_1, r_2 — коэффициенты отражения зеркал резонатора; λ — длина волны излучения). Углы распространения поперечных мод составляют $\theta_m = \sqrt{m\lambda/L}$, где $m = 1, 2, 3, \dots$ — номер модовой составляющей [11]. Поперечные моды, распространяющиеся под углом к оптической оси лазера, пройдя некоторое расстояние по открытым трассам, уходят из пучка. Для $L = 1,0$ м и длины волны излучения 0,8 мкм это расстояние менее 10 м, что подтверждает справедливость вывода о совпадении групповой скорости (скорости перемещения интерференционных полос) со скоростью света.

Методика проведения расчетов. Электрическую составляющую световой волны (как и магнитную составляющую) можно представить в виде

$$E^i = E_0^i \cos(\omega_i t - k_i z + \varphi_0^i), \quad (1)$$

где l — координата по направлению распространения излучения; $\omega_i = 2\pi f_i$.

При синхронизированной во времени генерации лазером одновременно N спектральных компонент (модовых составляющих) значения амплитуды в разных точках трассы могут быть определены путем сложения амплитуд отдельных компонент (с учетом знаков спектральных составляющих и ширины спектра каждой моды):

$$E = \sum_{i=1}^n E^i = \sum_{i=1}^n E_0^i \cos(\omega_i t - k_i z + \varphi_0^i). \quad (2)$$

Как известно, мощность электромагнитного излучения вдоль трассы распространения в ослабляющей среде уменьшается по экспоненциальному закону (закон Бугера): $I = I_0 \exp(-\alpha z)$, где α — коэффициент ослабления. Интенсивность излучения I пропорциональна квадрату амплитуды электрической составляющей электромагнитной волны:

$$I \sim \left(\sum_{i=1}^n E^i \right)^2 = \left(\sum_{i=1}^n E_0^i \cos(\omega_i t - k_i z) \right)^2. \quad (3)$$

При изучении возможности передачи сигнала через ослабляющие участки оптических каналов связи с использованием интерференционного потока были проведены расчеты коэффициентов пропускания для различных относительных положений ослабляющего участка и фазы коротких (10^{-9} с) периодических импульсов излучения (5 МГц). Для формирования периодических лазерных импульсов

путем когерентного суммирования нескольких составляющих необходимо синхронизировать фазы отдельных спектральных компонент. Для простоты расчетов начальные фазы волн в формуле (2) принимались равными нулю.

Расчеты показали, что при интерференции 150 модовых составляющих амплитуда сигнала, прошедшего через участок длиной 66 м с коэффициентом ослабления $0,17 \text{ м}^{-1}$, составляет 98 % от начальной величины. Интенсивность рассчитывали для моментов времени, отстоящих друг от друга на 10^{-13} с. Ослабляющий участок располагался в области преимущественно туннельной передачи энергии излучения симметрично относительно импульсов.

Методика проведения расчетов заключалась в следующем. В начальной точке (с нулевой координатой) находили сумму амплитудных значений всех гармонических составляющих. Для остальных расчетных точек трассы оптического пучка интенсивность сигнала определялась путем сложения гармонических сигналов с учетом их знаков (значения косинуса) — векторное сложение. Для определения интенсивности излучения сумма возводилась в квадрат и умножалась на коэффициент $c/8\pi$, так как интенсивность света связана с комплексной амплитудой волны $I = \frac{c}{8\pi} |E|^2$.

Расчет ослабления проводился двумя путями. В первом случае (скалярное некогерентное сложение волн) для определения суммарной начальной интенсивности все спектральные составляющие складывались по интенсивности (квадраты амплитуд). Полученную величину умножали на коэффициент $c/8\pi$. По закону Бугера определялась интенсивность суммарной волны после ослабляющего слоя. Без ослабляющего участка интенсивность излучения некогерентного пучка оставалась постоянной по всей длине трассы его распространения.

Для пучка из когерентных составляющих в каждой точке трассы производилось векторное суммирование волн на разных длинах волн. Для ослабляющего участка по закону Бугера определялось изменение эффективного значения интенсивности каждой гармонической составляющей между двумя расчетными точками с учетом отношения величин суммарной интенсивности в текущей точке к интенсивности некогерентного пучка. На следующем расчетном участке значения амплитуд напряженностей электрического поля отдельных волн были заменены их уменьшенными значениями на конце предыдущего участка, определяемого из выражения

$$E_0^{\text{вых}}(i) = E_0^{\text{вх}}(i) \sqrt{1 - \delta I_0 [1 - \exp(-\alpha \Delta l)]},$$

где α — коэффициент ослабления; Δl — длина расчетного участка; δI_0 — коэффициент, определяющий величину изменения интенсивности когерентного излучения относительно некогерентного на расчетном участке за счет интерференционного потока.

Как видно из рис. 1, между двумя максимумами наблюдаются незначительные спадающие всплески интенсивности. Область минимальных значений дополнительных импульсов находится посередине между двумя импульсами. Поэтому рассчитывался коэффициент прохождения через ослабляющий участок трассы, расположенный симметрично относительно середины между импульсами, что обеспечивает наилучшие условия прохождения потока оптического излучения (минимальное ослабление).

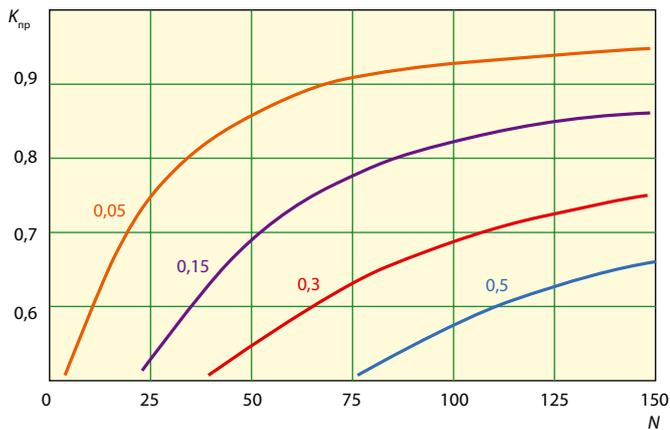


Рис. 2

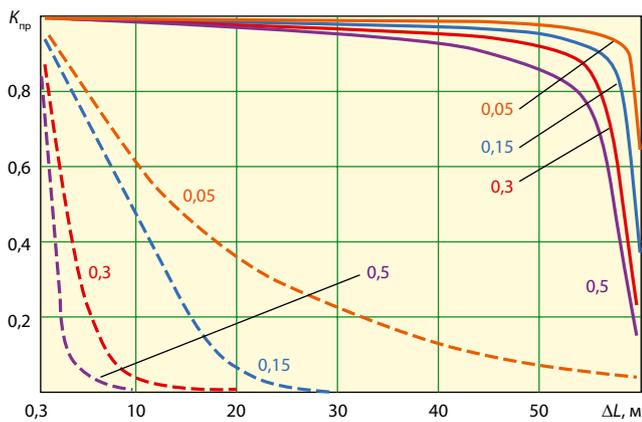


Рис. 3

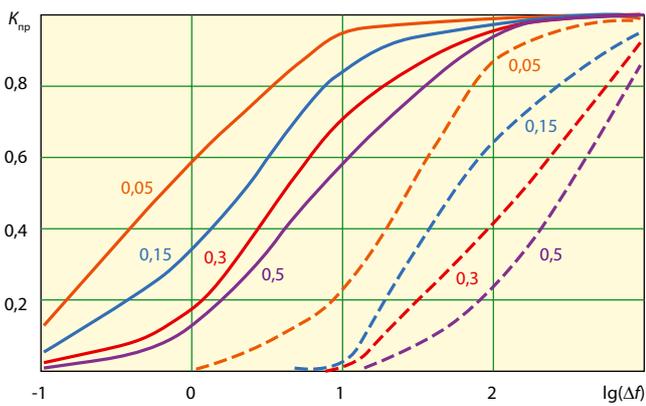


Рис. 4

Зависимость коэффициента пропускания ослабляющего участка от спектрального состава для различных значений оптической плотности показана на рис. 2. Видно, что при увеличении числа спектральных составляющих, независимо от оптической плотности ослабляющего участка, наблюдается увеличение коэффициента пропускания потока лазерного излучения. При сдвиге составляющих 5 МГц период биений между различными спектральными составляющими излучения с центральной частотой $f_0 = 5,637362 \cdot 10^{14}$ Гц равен 60,81 м. Коэффициент прохождения лазерного излучения через ослабляющий слой рассчитан для участка длиной 58,38 м, расположенного симметрично между интерференционными максимумами.

Для сравнения с полученными результатами был рассчитан коэффициент прохождения потока некогерентного излучения, имеющего тот же спектральный состав, что

и когерентный пучок. Зависимость коэффициента прохождения лазерного и некогерентного излучений через ослабляющий участок от его длины показана на рис. 3. При этом коэффициент пропускания для участка с коэффициентом ослабления $0,05 \text{ м}^{-1}$ составляет 0,056; для участка с $0,15 \text{ м}^{-1}$ — $1,78 \cdot 10^{-4}$; для ослабляющего слоя с $0,3 \text{ м}^{-1}$ и более — практически равен нулю (менее 10^{-7}). Таким образом, когерентный пучок (сплошные линии на рисунках) проходит через ослабляющий слой с гораздо меньшими потерями, чем некогерентный (пунктирные линии).

На рис. 4 приведены графики зависимостей коэффициента прохождения через ослабляющий слой лазерного (сплошные линии) и некогерентного (пунктирные линии) излучений от спектрального состава. Расчеты показывают, что когерентный пучок распространяется по ослабляющим трассам с гораздо меньшими потерями, чем некогерентный. Изменения спектрального состава (частоты сдвига соседних компонент Δf) при этом сказываются незначительно. Данные рассчитывались для ослабляющего слоя, расположенного симметрично и занимающего 96% расстояния между максимумами интерференции, при изменении величины спектрального сдвига между компонентами.

Данные, приведенные на рис. 3 и 4, рассчитаны для $N = 120$ составляющих. Интенсивность некогерентного пучка уменьшается в ослабляющем слое по экспоненциальному закону ($\Delta f = 5$ МГц). При малых значениях отношения длины ослабляющего участка к расстоянию между максимумами интерференции ($\Delta l < 55$ м) влияние ослабляющего слоя незначительно. При совмещении области максимума интерференции с ослабляющим слоем потери излучения возрастают.

Уменьшение коэффициента пропускания слоя при уменьшении величины сдвига спектральных компонент происходит из-за увеличения расстояния между максимумами интерференции. При этом синхронно увеличивается длина ослабляющего слоя, учитываемого при расчетах. Графики, приведенные на рис. 4, позволяют оценить соотношение коэффициентов пропускания когерентного и некогерентного пучков различного спектрального состава с предельной для когерентного пучка длиной ослабляющего слоя.

Заключение. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о существовании принципиальной возможности передачи потока когерентного оптического излучения через ослабляющие участки открытых атмосферных трасс с использованием интерференционного потока. При этом становится возможной передача оптического излучения на большие расстояния как по открытым атмосферным, так и по направленным каналам связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Крюков П.** Лазер — замечательное достижение XX века//Квант. — 2007. — № 3. — С. 8—18.
2. **Козлов С.А.** Проблемы нелинейной оптики импульсов предельно коротких длительностей//Вестник молодых ученых. Серия «Физические науки». — 2000. — № 1. — С. 7—16.
3. **Козлов С.А.** Поляризационное самовоздействие импульсов из нескольких колебаний светового поля в диэлектрических средах//Оптика и спектроскопия. — 1998. — Т. 84. — Вып. 6. — С. 979—981.
4. **Сухоруков А.П.** Оптика сверхкоротких импульсов//Соросовский образовательный журнал. — 1997. — № 7. — С. 81—86.

5. Михайлов Ю. М., Платоненко В. Т., Чжан Ц. Однофокусный режим распространения фемтосекундных световых пакетов при их самофокусировке в конденсированной среде // ЖЭТФ. — 2009. — Т. 135. — Вып. 2. — С. 211—226.
6. Kandidov V. P., Militsin V. O. Computer simulation of laser pulse filament generation in rain // Applied Physics B: Lasers and Optics. — 2006. — V. 83. — № 2. — P. 171—174.
7. Апексимов Д. В., Гейнц Ю. Э., Землянов А. А. Факторы эффективности рассеяния, поглощения, обратного рассеяния последовательности фемтосекундных лазерных импульсов на прозрачной сферической частице // Изв. вузов. Физика. — 2008. — Т. 51. — № 3. — С. 33—36.
8. Афанасьев С. А., Семенцев Д. И. Потoki энергии при интерференции электромагнитных волн // Успехи физических наук. — 2008. — Т. 178. — № 4. — С. 377—384.
9. Опико-электронные методы изучения аэрозолей / Беляев С. П., Никифорова Н. К., Смирнов В. В., Щелчков Г. И. — М.: Энергоатомиздат, 1981.
10. Сороко Л. М. Сверхразрешение в оптике и затухающие волны. — <http://bsfp.media-security.ru/school5/8.htm>.
11. Летуа С. Н. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Основы физики лазеров». — Оренбург: ОГУ, 1999.

Получено 15.09.09

Рецензия

УЧЕБНИК, КОТОРОГО ЖДАЛИ

Гольдштейн Б. С.,
Соколов Н. А.,
Яновский Г. Г.

Сети связи: Учебник для вузов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2010. — 400 с., ил.

Авторы учебника — известные российские специалисты в области теории и техники связи, профессора Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ). Книга имеет гриф Учебно-методического объединения (УМО) высших учебных заведений РФ по образованию в области телекоммуникаций по специальности «сети связи и системы коммутации». Высокий уровень издания подтвержден рецензентами — профессорами А. П. Пшеничниковым и В. В. Лебедевцевым.

В предисловии к учебнику, написанному ректором СПбГУТ профессором А. А. Гоголем, справедливо отмечено, что подобные учебники не появлялись в России около 25 лет. Действительно, если проанализировать учебную литературу в рассматриваемой предметной области за последнюю четверть века, то окажется, что это книги либо зарубежных авторов (нередко с неудовлетворительным качеством перевода), либо отечественных, но с более узкой проблематикой, например по сетям подвижной связи или по сетям пакетной коммутации.

Такое положение дел отрицательно сказывалось на качестве программ по конкретным учебным дисциплинам, в том числе на содержании раздела «Обязательная литература», где лектор, не перегружая раздел большим числом ссылок, должен указать студенту учебную литературу не «стар-

ше» пяти лет и рекомендованную профильным УМО. Рецензируемый учебник, конечно, не полностью, но решает эту важнейшую проблему при подготовке специалистов в профильных вузах страны.

Учебник состоит из трех частей: телефонная сеть общего пользования (1), сети подвижной связи (2) и сети пакетной коммутации (3). С точки зрения эволюции телекоммуникаций учебник охватывает практически все базовые аспекты сетей 2-го и, в большей части, 3-го поколения. По изложению материала все части достаточно независимы, что делает учебник универсальным в плане применения в различных дисциплинах. Однако в процессе преподавания методически важно сохранять предложенную авторами последовательность изучения предмета, иначе у студентов может сложиться искаженное представление о сетях телекоммуникаций. Например, студенты естественно-научных и ряда технических специальностей, слушая только курс «Компьютерные сети», могут не получить целостного представления о режимах коммутации данных или будут считать, что Интернет доминирует по отношению к другим типам сетей.

Включение данного учебника в список основной или дополнительной литературы программ дисциплин непрофильных специальностей поможет сформировать у учащихся правильное мировоззрение в области телекоммуникаций.

Каждая часть книги состоит из 10 глав, названных авторами лекциями, и освещает спектр вопросов в последовательности и объеме, достаточных для полного и замкнутого описа-

ния соответствующего объекта изучения: историческая справка, принципы построения сети, сетевые технологии, сигнализация, стандартизация, нумерация или адресация, услуги и принципы их предоставления, качество обслуживания, задачи проектирования или расчета сети, перспективы развития.

Нельзя не отметить, что учебник хорошо иллюстрирован и, что немаловажно, содержит список дополнительной литературы, список сокращений, предметный и именной указатели. Каждая глава завершается контрольными вопросами, типовыми задачами и упражнениями, а также списком рекомендованной литературы.

Авторы не позиционируют учебник относительно конкретной учебной дисциплины и не дают рекомендаций по продолжительности чтения соответствующего курса лекций. Тем не менее ясно, что по числу лекций, а их в учебнике, включая вводную, тридцать одна, такой курс рассчитан по крайней мере на два семестра, причем часть материала придется оставить для самостоятельного изучения.

Таким образом, в России теперь появился отечественный учебник по современным сетям связи, вполне доступный для усвоения учебного материала студентам не только профильных, но и родственных специальностей. В случае переиздания книги хотелось бы порекомендовать авторам дополнить его примерами решения типовых задач и заданиями для самостоятельной работы.

К. Е. Самуйлов,
зав. кафедрой систем телекоммуникаций РУДН, д. т. н., профессор