

УДК 621.373.826:772.99

ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ С ОТКРЫТЫМ РЕЗОНАТОРОМ

В. П. Титарь

*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, пл. Свободы, 4, Харьков, 61022, Украина;
e-mail: inhol@ukr.net*

Поступила в редакцию 12 мая 2016 г.

. Предложена атмосферная лазерная система связи с открытым резонатором, одно из зеркал которого обращает волновой фронт, а в качестве второго зеркала резонатора служит оптика приемной станции системы. Такие системы связи с импульсной модуляцией и импульсным режимом работы оптического квантового генератора с открытым резонатором позволяют с чрезвычайно высокой скоростью передавать информацию во время излучения каждого импульса. Приведены теоретические оценки эффективности работы атмосферной лазерной системы связи. Определена дальность действия лазерной системы связи с учетом рассеяния излучения в атмосферных газах и аэрозолях, а также влияние атмосферных турбулентностей. Определена интенсивность излучения накачки лазерного генератора с открытым резонатором и выходная мощность на отражающей поверхности объективов приемной станции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: лазерная связь, атмосферная лазерная система, открытый резонатор, импульсный квантовый генератор, передающая станция, приемная станция, импульсный режим работы.

Запропонована атмосферна лазерна система зв'язку з відкритим резонатором, одне із дзеркал якого обертає хвильовий фронт, а другим дзеркалом резонатора слугує оптика приймальної станції системи. Такі системи зв'язку з імпульсною модуляцією та імпульсним режимом роботи оптичного квантового генератора з відкритим резонатором дає змогу з надвисокою швидкістю передавати інформацію під час випромінювання кожного імпульсу. Наведено теоретичні оцінки ефективності роботи атмосферної лазерної системи зв'язку. Визначена дальність дії лазерної системи зв'язку з урахуванням розсіювання випромінювання в атмосферних газах та аерозолях, а також вплив атмосферних турбулентностей. Визначена інтенсивність випромінювання накачки лазерного генератора з відкритим резонатором і вихідна потужність на відбиваючій поверхні об'єктивів приймальної станції.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: лазерний зв'язок, атмосферна лазерна система, відкритий резонатор, імпульсний квантовий генератор, передаюча станція, приймальна станція, імпульсний режим роботи.

An atmospheric laser communication system with an open cavity is proposed. One of the cavity mirrors can perform a phase conjugation, while the other is formed by optics system of the receiving station. This communication system using a pulse modulation and pulse mode operation of quantum generator allows high speed data transfer. The theoretical evaluation of the of the system effectiveness was evaluated theoretically. The range of action of the laser communication system was defined taken into account scattering on atmospheric gases and aerosols, as well as the effects of atmospheric turbulence. The pumping intensity for the laser communication system and the power reflected at the lens surfaces was defined.

KEY WORDS: laser communication, atmosphere laser system, open cavity, pulse quantum generator, transmitter station, receiving system, pulse mode

ВВЕДЕНИЕ

Лазерная связь осуществляется путем передачи информации с помощью электромагнитных волн оптического диапазона. Лазерные системы связи делятся на открытые, где сигнал передается в атмосфере или космосе, и закрытые – использующие световоды. В настоящей статье будем рассматривать только открытые лазерные системы связи.

Современное широкое распространение атмосферных лазерных систем связи (АЛСС) во многих странах мира началось в 1998 г., когда были созданы недорогие полупроводниковые лазеры мощностью 100 мВт и более. В это же время возникла потребность в лазерной связи, так как стали стремительно развиваться информационные технологии [1]. Резко увеличилось число абонентов, требующих предоставления таких телекоммуникационных услуг, как Интернет, IP-телефония, кабельное телевидение с большим числом каналов, компьютерные сети и т.д. В результате возникла проблема "последней мили" [2], то есть подключение широкополосного канала связи непосредственно к конечному пользователю.

Прокладка новых кабельных сетей требует крупных капиталовложений, а в ряде случаев, особенно в условиях плотной городской застройки, очень трудна или даже невозможна. Оптимальным решением проблемы последнего участка является использование беспроводных линий передачи [3]. Стандарт IEEE 802.11 предусматривает для этих целей СВЧ или оптический диапазон

излучений. В отличие от СВЧ оптический диапазон совершенно свободен, и его использование не требует согласования частного канала связи. Он обеспечивает высокую скорость передачи информации, ее защиту от несанкционированного доступа, помехоустойчивость, низкое энергопотребление. Поэтому наиболее полным решением проблемы "последней мили" является передача информации лазерным лучом [4].

АТМОСФЕРНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ (АЛСС)

АЛСС между двумя пунктами состоит из двух спаренных приемо-передающих устройств, расположенных в пределах прямой видимости на обоих концах линии связи и направленных друг на друга присоединений типа "точка – точка".

В передатчике находится генератор-лазер и модулятор оптического излучения для передаваемых сигналов. Модулированный лазерный луч коллимируется оптической системой и направляется в сторону приемника. В приемнике излучение фокусируется на фотоприемник, где производится его детектирование и выделение передаваемой информации. Так как лазерный луч передается между пунктами связи в атмосфере, то его распространение сильно зависит от метеорологических условий, от наличия дыма, пыли и других загрязнений воздуха. Кроме того, в атмосфере наблюдаются турбулентные явления, которые приводят к флуктуациям показателя преломления среды, колебаниям луча и искажениям принимаемого сигнала. Однако, несмотря на указанные проблемы, атмосферная лазерная связь оказалась вполне надежной на расстояния от нескольких километров до нескольких сотен километров при соблюдении определенных условий.

Самым главным из них, без выполнения которого связь будет не возможна, является то, что здания должны находиться в пределах прямой видимости. При этом не должно быть непрозрачных препятствий на пути распространения луча. Кроме того, поскольку лазерный луч в области приемника имеет диаметр 2 м, необходимо, чтобы приемо-передатчики находились над пешеходами и потоком транспорта на высоте, не ниже 5 м. Это связано с обеспечением правил безопасности. Транспорт также является источником газов и пыли, которые влияют на надежность и качество передачи. Луч не должен распространяться в непосредственной близости от линий электропередач или пересекать их. Необходимо учесть возможный рост деревьев, движение их крон при порывах ветра, а также влияние атмосферных осадков и возможный сбой в работе из-за пролетающих птиц.

Лазерное оборудование не является источником электромагнитного излучения (ЭМИ). Однако, если разместить его вблизи приборов с ЭМИ, то электронное оборудование лазера будет улавливать это излучение, что может вызвать изменение сигнала как в приемнике, так и в передатчике. Это повлияет на качество связи, поэтому не рекомендуется размещать лазерное оборудование вблизи таких источников ЭМИ, как мощные радиостанции, антенны и т.п. Вибрация может вызвать сдвиг лазерного приемо-передатчика. Во избежание этого не рекомендуется устанавливать лазерные системы вблизи моторов, компрессоров и т.п.

Современные системы лазерной связи быстро и качественно, надежно и эффективно решают проблему ближней связи между двумя зданиями, находящимися на расстоянии 1200 м и в прямой видимости. Без выполнения этих условий лазерная связь невозможна. Ее несомненными преимуществами являются [5]:

- "прозрачность" для большинства сетевых протоколов (Ethernet, Token Ring, Sonet/OC, ATM, FDDI и др.);
- высокая скорость передачи данных (до 155 Мбит/сек сегодня, до 1 Гбит/сек у анонсированного производителем оборудования);
- подведение сетевого трафика к лазерному приемо-передатчику при помощи кабельных или оптоволоконных устройств сопряжения;
- отсутствие необходимости получения разрешения на использование;
- относительно низкая стоимость лазерного оборудования по сравнению с радиосистемами.

Лазерные приемо-передатчики из-за низкой мощности их излучения не представляют опасности для здоровья. Следует отметить, что луч безопасен, птицы его видят и стараются уклониться, что существенно уменьшает вероятность сбоев. Если передаваемая информация доставляется к лазерному приемо-передатчику и от него по стандартному многомодовому оптоволоконному кабелю, то гарантируется передача данных без радиоволнового и электромагнитного излучения. Это не только обеспечивает отсутствие воздействия на работающее рядом оборудование, но и делает невозможным несанкционированный доступ к информации (получить его можно, только подобравшись непосредственно к приемо-передатчику).

ИМПУЛЬСНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Перспективными системами связи оптического диапазона являются системы с импульсной модуляцией и импульсным режимом работы оптического квантового генератора [6,7]. Такие системы позволяют с чрезвычайно высокой скоростью передавать информацию во время излучения каждого импульса. В предлагаемой нами системе информация, подлежащая передаче, регистрируется в запоминающем входном устройстве и подводится к модулятору света, размещенному на пути светового пучка лазера и обеспечивающему импульсно-кодированную модуляцию. При этом соответствующие схемы синхронизируют передачу информации запоминающим устройством от световых импульсов лазера. Световые импульсы доходят до приемного устройства, детектируются фотодетектором и передаются демодулятору, который преобразует их в электрические сигналы, соответствующие сигналам, зарегистрированным в запоминающем устройстве. Это устройство соединено со схемой синхронизации, а также читающими устройствами.

Блок-схема лазерной связи с импульсной модуляцией показана на рис. 1.

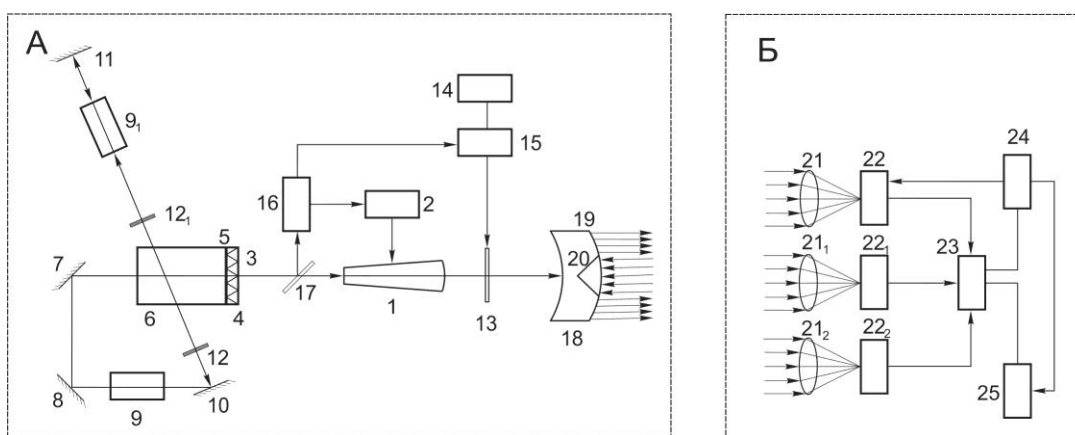


Рис. 1. Блок-схема атмосферной лазерной системы связи

А. Передающая станция АЛСС: 1 – активный элемент; 2 – блок накачки; 3 – матрица угловых отражателей; 4 – интерференционные фильтры; 5 – буферная среда; 6 – обращающий волной фронт элемент; 7, 8, 10, 11 – зеркала; 9, 9₁ – квантовые усилители; 12, 12₁ – поляризационные фильтры; 13 – амплитудный модулятор; 14 – информационный блок; 15 – преобразователь информации в электрические импульсы; 16 – схемы синхронизации; 17 – полупрозрачное зеркало; 18 – телескопическая система; 19 – коническое зеркало; 20 – отражатель. Б. Приемная станция: 21, 21₁, 21₂ – объективы; 22, 22₁, 22₂ – фотодетекторы; 23 – демодулятор; 24 – устройство воспроизведения; 25 – схемы синхронизации

Рассмотрим работу лазерной системы связи с открытым резонатором [8], одно из зеркал резонатора которого обращает волновой фронт лазерного излучения, а в качестве второго зеркала служат объективы приемного устройства, которые находятся в реальных атмосферных условиях и могут перемещаться в телесном угле распространения лазерного излучения, ограниченном геометрическими размерами рабочего элемента лазерной системы. Пусть область пространства, в которой находится приемная станция Б лазерной системы связи, облучается спонтанным излучением люминесценции активного элемента 1 лазера в широком телесном угле, причем в резонаторе передающей станции А отсутствует переднее зеркало. В результате создания инверсии населенности в активном лазерном элементе 1 формируется люминесцентное излучение, которое после отражения от объективов 21, 21₁, 21₂, в данном случае играющих роль недостающего зеркала резонатора, вновь пропускается через активный элемент 1. При этом возникают потоки вынужденного излучения, которые после обращения волновых фронтов специальным устройством 3 вновь пропускают через активный элемент 1. Это позволяет концентрировать на объективах 21, 21₁, 21₂ приемной станции Б в области зондируемого пространства вынужденное когерентное излучение, усиленное за счет многократного отражения от поверхности объективов 21, 21₁, 21₂ и прохождения через активный элемент 1.

В активном элементе 1 с помощью блока накачки 2 создается инверсия населенности, в результате чего возникает излучение люминесценции активного элемента 1. Это некогерентное

излучение имеет довольно широкий спектр и распространяется во все стороны. С помощью телескопической системы 18, состоящей из усеченного полого конического отражателя 19 с внутренней зеркальной поверхностью и расположенного соосно ему конического отражателя 20 с зеркальной внешней поверхностью, основная часть люминесцентного излучения направляется на объективы 21, 21₁, 21₂ приемной станции Б. Отраженное от объективов 21, 21₁, 21₂ излучение принимается с помощью телескопической системы 18, пропускается через активный элемент 1 и направляется на матрицу уголковых отражателей 3, расположенных в заднем фокусе телескопической системы 18.

Грани уголковых отражателей матрицы 3 покрыты зеркальными слоями веществ, состав и толщина которых подобраны так, чтобы интерференционные фильтры 4 имели линию пропускания, соответствующую лазерной линии используемого активного элемента 1. Матрица уголковых отражателей 3 возвращает отраженное люминесцентное излучение в те участки пространства, которые являются вторичными источниками излучения, то есть на поверхность объективов 21, 21₁, 21₂ приемной станции Б.

Таким образом, излучение, отраженное от поверхности объективов 21, 21₁, 21₂, проходит через телескопическую систему 18 и через активный элемент 1, в котором оно усиливается, отражается от матрицы уголковых отражателей 3, опять проходит с усилением через активный элемент 1 и с помощью телескопической системы 18 снова распространяется в направлении расположения объективов 21, 21₁, 21₂ приемной станции Б. В этом случае максимумы интенсивности выходного люминесцентного излучения расположены в направлении на объективы, что приводит к увеличению интенсивности излучения в этих направлениях по сравнению с предыдущим моментом облучения. В результате этого от объективов 21, 21₁, 21₂ приемной станции Б приходит сигнал с большей интенсивностью, который снова усиливается и концентрируется в направлениях на объективы 21, 21₁, 21₂.

Высокая чувствительность лазерной системы при приеме слабых сигналов обеспечивается использованием широкополосного люминесцентного излучения для облучения объективов 21, 21₁, 21₂ приемной станции Б, что позволяет получать на прямом проходе через активный элемент 1 к матрице уголковых отражателей 3 максимальное усиление в линейном режиме работы, а на обратном проходе излучения получать высокую степень энергосъема в режиме глубокого насыщения. Если в активном элементе 1 поддерживать инверсию населенности, то через несколько проходов излучения между матрицей уголковых отражателей 3 и объективами 21, 21₁, 21₂ приемной станции Б возникает лазерная генерация. При этом поверхности объективов 21, 21₁, 21₂ играют роль второго зеркала резонатора лазера. Причем генерация может возникать одновременно в различных направлениях, на несколько объектов, расположенных в поле видимости лазерной системы, которая будет автоматически "следить" за их перемещением в пространстве.

За матрицей уголковых отражателей 3 в оптическом контакте установлен элемент 6, обращающий волновой фронт. Оптический контакт осуществляется с помощью буферной среды 5 с показателем преломления среды, равным показателю преломления материала, из которого изготовлены уголковые отражатели матрицы 3. В этом случае матрица уголковых отражателей 3 с нанесенными на их нерабочие поверхности интерференционными покрытиями 4 оказывается прозрачной только для излучения с лазерной частотой активного элемента 1 и отражает излучение всех других частот, то есть является непрозрачным фильтром для паразитных засветок.

При возникновении генерации в длинном резонаторе, образованном матрицей уголковых отражателей 3 и отражающей поверхностью объективов 21, 21₁, 21₂ приемной станции Б, лазерное излучение проходит через интерференционное покрытие 4 и попадает в элемент 6. После того, как излучение проходит через обращающий волновой фронт элемент 6 с помощью зеркал 7, 8, 10, 11 формируется два опорных пучка, идущих навстречу друг другу. Эти опорные когерентные пучки усиливаются с помощью квантовых усилителей 9, 9₁ и фильтруются от паразитных засветок с помощью поляризационных фильтров 12, 12₁.

Реализация такого варианта четырехволнового смещения в нелинейном элементе 6 позволяет при любой относительной скорости объективов 21, 21₁, 21₂ приемной станции Б по отношению к передающей станции А компенсировать доплеровский сдвиг по отношению к частоте опорных пучков. Обращающий волновой фронт элемент 6 в этом случае компенсирует статические и динамические искажения, обусловленные несовершенством оптических элементов и динамическими возмущениями, возникающими вследствие тепловых и механических нагрузок лазерных элементов, а также наличием турбулентной атмосферы в длинном резонаторе лазерной системы связи. Вследствие этого длинный резонатор лазерной системы связи с помощью элемента 6 снимает запасенную в активном элементе 1 энергию с высокой эффективностью, поскольку в используемом длинном резонаторе АЛСС с обращением волнового фронта на основе четырехволнового смещения

применяется сразу два опорных локальных пучка, интенсивность выходного пучка в направлении на объективы 21, 21₁, 21₂ приемной станции Б может превышать интенсивность зондирующего пучка на входе. Иначе говоря, при реализуемом четырехволновом смещении можно получить дополнительное оптическое усиление и поскольку элемент 6 отражает все излучение назад к объективам 21, 21₁, 21₂, генерация излучения будет происходить даже при малых коэффициентах отражения поверхности объективов 21, 21₁, 21₂ приемной станции Б или при ее перемещениях с большой скоростью, что важно при космической связи.

Следовательно, при незначительных изменениях параметров турбулентной атмосферы и положения приемной станции Б в пространстве за время прохождения лазерного излучения туда и обратно использование отражающего волновой фронт элемента 6 не только позволяет компенсировать влияние турбулентной атмосферы, но и дает возможность лазерному лучу следовать за объективами 21, 21₁, 21₂ приемной станции Б, непрерывно удерживая на них сфокусированные пучки. При этом точность фокусировки ограничена только волновой природой света (дифракционными эффектами) и не зависит от ориентации фокусирующей системы, а фокусировка осуществляется практически безынерционно за время, необходимое для прохождения импульса излучения двойного расстояния от передающей станции А к приемной станции Б.

Подлежащая передачи информация, представленная в виде звуковых или кодированных сигналов, накапливается в запоминающем входном устройстве информационного блока 14, затем преобразуется в преобразователе информации 15 в электрические импульсы, которые используются для модуляции импульсов когерентного света, излучаемых лазером с помощью модулятора 13. При этом соответствующие схемы 16 синхронизируют передачу информации запоминающим устройством 14 от световых импульсов лазера. Световые импульсы доходят до объективов 21, 21₁, 21₂ приемной станции Б, детектируются фотодетекторами 22, 22₁, 22₂ и передаются демодулятору 23, который преобразует в электрические сигналы, соответствующие сигналам, зарегистрированным в запоминающем устройстве 14 передающей станции А. Это устройство соединено со схемой синхронизации 25, а также устройством воспроизведения 24.

Импульсная лазерная система связи может применяться не только на расстоянии в пределах прямой видимости. С помощью такой лазерной системы связи можно установить связь и через газовую плазму, в то время как через нее электромагнитные волны радиочастотного диапазона не проходят. Система лазерной связи может также использоваться для передачи информации через поверхность раздела воздух – море. Состояние поверхности моря переменчивое из-за волн, характеризуется составляющими, частота которых находится в диапазоне волн радиосвязи.

В разработанной системе применяется рубиновый лазер с открытым резонатором и продолжительностью генерируемых импульсов приблизительно 10⁻⁴ сек. Расхождение луча лазера составляет 0,05 град. Это позволяет установить устойчивую связь на большие расстояния между пунктами, расположенными на поверхности земли. При использовании в качестве источников световой несущей рубиновых лазеров следует учитывать, что они имеют значительно больший уровень шумов, чем газовые лазеры непрерывного действия. Достоинства предлагаемой системы состоит в том, что благодаря использованию помехоустойчивой импульсно-кодовой модуляции она допускает значительно больший уровень шума как в передающей, так и в приемной станциях.

УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГЕНЕРАЦИИ В ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЕ СВЯЗИ С ОТКРЫТЫМ РЕЗОНАТОРОМ

Рассмотрим условия, при которых в лазерной системе связи с открытым резонатором между объективами 21, 21₁, 21₂ приемной станции Б и активным отражателем 6 передающей станции А может возникать генерация. Для определенности будем считать, что активный элемент 1 представляет собой трехуровневую квантовую систему, например, розовый рубин. Процессы поглощения и излучения в трехуровневой системе описываются следующей системой уравнений [9]:

$$N_1 + N_2 = N, \quad (1)$$

$$N_2' = W_p N_1 - Bq(N_2 - N_1) - N_2 / \tau; \quad (2)$$

$$q' = V_a Bq(N_2 - N_1) - q / \tau_c \quad (3)$$

где N_1 – число частиц в основном состоянии; N_2 – число частиц в возбужденном состоянии; N – полное число активных частиц; N_2' – скорость нарастания числа возбужденных частиц; W_p – скорость накачки; B – скорость вынужденного излучения на один фотон в моде; q – число фотонов в резонаторе; τ – время жизни частиц в возбужденном состоянии; q' – скорость изменения фотонов в резонаторе; V_a – объем, занимаемый модой в активном элементе; τ_c – время жизни фотона в резонаторе.

Изменение ΔJ интенсивности волны J в пространственном резонаторе при прохождении волной слоя Δz в активном элементе определяется соотношением:

$$\Delta J = \sigma(N_2 - N_1)J \Delta z, \quad (4)$$

где σ – сечение перехода на частоте рассматриваемой моды резонатора. Изменение интенсивности ΔJ при полном проходе резонатора можно записать в виде:

$$\Delta J = \left\{ (1-T_1)(1-T_2) \cdot (1-T_i) \exp[2\sigma(N_2 - N_1)l] - 1 \right\} J, \quad (5)$$

где l – длина активного элемента; T_1 – коэффициент отражения зеркала отражателя; T_2 – коэффициент отражения поверхности объективов; T_i – внутренние потери в резонаторе, которые включают в себя потери, обусловленные рассеянием излучения в активной среде; потери вследствие рассеяния и поглощения излучения покрытиями зеркал (отражателя и отражающей поверхности объективов 21, 21₁, 21₂); дифракционные потери.

Потери за проход определяются как:

$$\gamma_1 = -\ln(1-T_1), \quad \gamma_2 = -\ln(1-T_2) = -\ln(1-T_i) \quad (6)$$

Можно считать, что суммарные потери равны

$$\Delta\gamma = \gamma_i + \gamma_u \quad (7)$$

где $\gamma_u = (\gamma_1 - \gamma_2) / 2$ – средние потери, определяемые пропусканием зеркал.

Подставив в (5) введенные обозначения из (6) и (7) и предполагая, что $\sigma(N_2 - N_1) \cdot l - \gamma \ll 1$, в выражении (5) экспоненциальный член можно разложить в ряд по степеням $(N_2 - N_1)$, что дает в первом приближении:

$$\Delta J = 2[\sigma(N_2 - N_1)l - \gamma] J \quad (8)$$

Разделив обе части этого выражения на временной интервал $\Delta t = 2L/c$ (L – длина резонатора; c – скорость света в среде резонатора), за который излучение проходит через весь резонатор, и воспользовавшись приближением $\Delta J / \Delta t \cong dJ / dt$, получим:

$$dJ / dt = \left\{ \left[\sigma l c (N_2 - N_1) / L \right] - \gamma c / L \right\} J \quad (9)$$

Поскольку число фотонов q в резонаторе пропорционально J , то, сравнивая (9) с (3), находим:

$$B = \sigma l c / V_a L = \sigma c / N \quad (10)$$

$$\tau_c = L / \gamma c \quad (11)$$

Отсюда следует, что скорость вынужденных переходов прямо пропорциональна длине активного элемента и обратно пропорциональна длине резонатора, а время жизни фотона в резонаторе пропорционально длине резонатора и убывает с увеличением суммарных потерь.

Введя обозначение для инверсии населенностей $N = (N_2 - N_1)$, систему уравнений (1) можно свести к двум уравнениям в переменных $N(t)$ и $q(t)$

$$N' = W_p(N_i - N) - 2BqN - (N_i - N) / \tau \quad (12)$$

$$q' = [V_a B N - 1 / \tau_c] \cdot q \quad (13)$$

Эти уравнения совместно с явными выражениями для B и τ_c описывают стационарный и нестационарный режимы работы трехуровневого лазера. Из (13) видно, что для того, чтобы скорость изменения числа фотонов была положительной, то есть $q' > 0$, должно выполняться условие

$$V_a B N > \frac{1}{\tau_c} \quad (14)$$

Следовательно, генерация возникает, когда инверсия населенностей достигает некоторого критического значения N_c , определяемого выражением:

$$N_c = \frac{1}{V_a B \tau_c} = \frac{\gamma}{\sigma l}, \quad (15)$$

при выводе которого использовалось соотношение (10). Таким образом, инверсная населенность прямо пропорционально зависит от потерь и не зависит от длины резонатора.

Внутренние потери в рубине зависят от качества кристалла и равны $\gamma_i = 5 \times 10^{-2}$. Потери в диэлектрических покрытиях пренебрежимо малы, то есть потери в зеркале резонатора равны $\gamma_i = 0$. Потери на отражающей поверхности объективов с полированной поверхностью можно сравнить с потерями в переднем зеркале обычного лазера, то есть $\gamma_2 = 5 \times 10^{-2}$. Дифракционными потерями в обычном лазере, как правило, пренебрегают, так как они равны примерно 10^{-5} . В рассматриваемом

случае, когда длина резонатора может исчисляться километрами, необходимо учитывать их влияние на условие возникновения генерации. Число Френеля TEM_{000} в первом приближении определяется выражением:

$$M = \frac{a^2}{L\lambda} \quad (16)$$

где a – радиус стержня активного элемента, λ – длина волны излучения. Подставив в (16) следующие значения параметров: $a = 2$ см, $L = 1$ км, $\lambda = 0,694$ мкм, получим значение $M = 0,6$ при этом потери равны 10^{-4} , что на порядок превышает остальные виды потерь. Единственный путь их уменьшения – это увеличение диаметра активного элемента. Так, при $a = 5$ см число Френеля для длины резонатора 1 км будет равно 3,9, и дифракционные потери будут такими же, как и в обычном лазере, и ими можно пренебречь.

Необходимо также учесть и специфический для данного случая вид потерь – атмосферные потери, обусловленные поглощением и рассеянием излучения в атмосферных газах и аэрозолях, а также влиянием атмосферных турбулентностей. Поскольку мы рассматриваем импульсный режим работы активного отражателя, то при длительностях импульса $10^{-4} \dots 10^{-3}$ с турбулентностью можно пренебречь. Коэффициент поглощения в атмосфере существенно зависит от длины волны излучения и для рубинового лазера изменяется в пределах $8 \times 10^{-2} \dots 18 \times 10^{-2}$ км $^{-1}$.

Обычно учитывают два вида рассеяния: релеевское или молекулярное и Ми-рассеяние. Коэффициент поглощения за счет релеевского рассеяния на длине волны излучения рубинового лазера составляет $0,5 \times 10^{-2}$ км $^{-1}$. Наиболее существенное влияние на суммарные потери в лазере, а, следовательно, и на инверсную населенность, оказывает рассеяние на аэрозолях (Ми-рассеяние), которое может изменяться в широких пределах, особенно при наличии тумана и дождя (до 60 дБ/км). В литературе отсутствуют данные по рассеянию излучения на длине волны 0,694 мкм, однако, экстраполируя значения коэффициента рассеяния, полученные на длине волны 1,06 мкм (при отсутствии тумана и дождя), можно получить величину порядка 20×10^{-2} км $^{-1}$.

Из (15) следует, что для уменьшения критического значения инверсии населенности N_c необходимо увеличить длину активного элемента. Это требование выполняется в каскадных отражателях типа "кошачий глаз", в которых эффективная длина активного элемента увеличивается за счет многократного прохождения излучения в нем.

Предварительные теоретические оценки показали, что эффективность работы лазерной системы связи реализуется при следующих условиях:

1. Дальность действия лазерной системы связи обусловлена временем жизни τ_c верхнего лазерного уровня. Так, например, для лазера на рубине $\tau_c \approx 3 \times 10^{-3}$ с и, соответственно, дальность действия в вакууме $\Delta L/2 = \tau_c c/2 = 450$ км, где c – скорость света а 2 в знаменателе означает, что кванты лазерного излучения должны пройти путь от лазера к объективам и обратно.

2. Порог генерации определяется коэффициентами отражения зеркал резонатора T_1 , и потерями внутри резонатора, то есть пространственным коэффициентом ослабления T_i атмосферы между задним отражателем резонатора и отражающей поверхностью объективов, при этом порог генерации достигается при выполнении условия [9]:

$$(1 - T_1)(1 - T_2)(1 - T_i)^2 \exp(2\sigma N_c l) = 1 \quad (17)$$

где T_1 и T_2 – коэффициенты отражения заднего отражателя и объективов. Таким образом, для достижения порога генерации величина N_c должна быть достаточно большой, чтобы компенсировать полные потери в резонаторе. Оценка величины N_c для лазера на розовом рубине при $T_1 = 0$, $T_2 = 40\%$, $T_i = 50\%$, $l = 30$ с дает значение $N_c = 6,5 \times 10^{17}$ ионов Cr^{3+}/cm^3 . При этом предельная инверсия населенности N_c , необходимая для возникновения генерации, при наличии больших потерь внутри резонатора определяется концентрацией активных ионов для розового рубина, которая равна $N_c = 6,5 \times 10^{17}$ ионов Cr^{3+}/cm^3 .

3. Интенсивность излучения накачки определяется скоростью накачки W_p , которая в предельном случае связана с временем жизни верхнего лазерного уровня соотношением:

$$W_{cp} \approx \frac{1}{\tau_c} \quad (18)$$

Таким образом, минимальная интенсивность J_H излучения лампы накачки определяется выражением:

$$J_H \approx \frac{W_{cp}}{0,3_{cp}} \approx \frac{1}{0,3\tau_{cp}} \quad (19)$$

и, например, для лазера на рубине она приблизительно равна $J_H=1000$ Вт/см². При увеличении потерь внутри резонатора J_H должна увеличиваться пропорционально $(N_t + N_c) \cdot (N_t - N_c)$.

4. Выходная мощность на отражающей поверхности объективов пропорциональна увеличению скорости накачки выше критического значения и не зависит от длины резонатора (то есть от расстояния между лазером и объективами приемной станции). Выходная мощность P на отражающей поверхности объективов определяется соотношением [5]:

$$P = \left[\frac{V_a(N_t + N_c)h\omega}{4\pi\tau} \right] \cdot \left[\frac{(\gamma_1 + \gamma_2)}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_w)} \right] \cdot \left[\frac{W_p}{W_{cp}} - 1 \right] \quad (20)$$

где $V_a = (\pi\omega_0^2 l / 4)$ – объем, занимаемый модой внутри активной среды; ω – размер пятна внутри резонатора; $\frac{h\omega}{2\pi}$ – энергия фотона; γ_1, γ_2 и γ_i определяются из (6). Тогда выходная мощность для рубинового лазера при значениях $V_a = 3$ см³; $N_t = 1,8 \times 10^{19}$ ионов Cr³⁺/см³; $N_c = 1,8 \times 10^{17}$ ионов Cr³⁺/см³; $h\omega / 2\pi = 2,8 \times 10^{19}$ Дж; $\tau = 3 \times 10^{-3}$ с; $\gamma_1 = 5,1 \times 10^{-1}$; $\gamma_2 = 0$; $\gamma_i = 3,6 \times 10^{-3}$, будет определяться величиной:

$$P = 200 \left[(W_p / W_{cp}) - 1 \right] \text{ Вт.} \quad (21)$$

Таким образом, если скорость накачки выше критического значения всего в два раза, то мощность излучения на поверхности объективов будет составлять 200 Вт.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Целью эксперимента являлось сравнение пространственно-энергетических и временных характеристик рубинового лазера с длинным резонатором, имеющим обычные зеркала и лазера с открытым резонатором. Проводились измерения энергий излучения E_B в ближней зоне и E_D в дальней зоне с помощью калориметров типа ЭП-50. Точность измерений составляла примерно 10%. Пространственные характеристики излучения оценивались по отношению E_B/E_D в угле 36°, соответствующем угловому размеру приемной площадки калориметра. Временные характеристики измерялись фотодиодом ФД-7К и регистрировались на запоминающем осциллографе С8-12. На измерительные приборы излучение отводилось стеклянными пластинами.

В качестве объектов, на которые наводилось лазерное излучение, использовались три фотоэлектронных умножителя типа ФЭУ-82. Макет лазерной системы связи был выполнен на основе усилительного блока голографической установки УИГ-12М. В качестве активного элемента использовался рубиновый стержень диаметром 16 мм, коэффициент усиления которого за один проход равнялся 6. Длинный резонатор лазерной системы имел длину 200 м.

Были проведены измерения характеристик излучения лазеров с длинным резонатором с обычными зеркалами и с длинным открытым резонатором, одно из зеркал которого обращало волновой фронт лазерного излучения, а в качестве второго использовались отражающие поверхности фотоумножителя, объектива и катафота. Для сравнения подбирали такой режим накачки, чтобы во всех двух случаях к моменту срыва генерации величины энергии накачки E_H были равны. Полученные экспериментальные результаты приведены в таблице.

Таблица. Результаты экспериментальных исследований.

Резонатор	E_H , кДж	E_B , Дж	E_D , Дж	Время задержки, $\tau_c \times 10^3$ с	Длительность импульса, $\tau_r \times 10^3$ с	Расходимость излучения, ф. угл. сек.	Дифракционная расходимость, $\phi_{диф}$, угл. сек.
Длинный	1,2	40	3,2	1,0	2,0	25	4
Открытый	1,2	40	40	1,2	1,5	8	4

Из таблицы видно, что хотя при использовании длинного резонатора энергия E_B излучения в ближней зоне в 2,5 раза падала, энергия E_D в дальней зоне в случае длинного резонатора была почти в 6 раз выше, а в случае открытого резонатора с обращаемым волновой фронт зеркалом была в 18 раз выше. Этот факт можно объяснить тем, что при использовании длинного резонатора и открытого резонатора с указанными параметрами лазерное излучение генерируется на одной поперечной моде и поэтому величина дифракционной составляющей расходимости $\phi_{диф}$ существенно уменьшается.

Поскольку полная расходимость излучения φ включает в себя искажения, вносимые атмосферой и дефектами активного элемента, то реальное уменьшение угловой расходимости φ для длинного резонатора на самом деле меньше, чем снижение $\varphi_{\text{диф}}$, а для открытого резонатора – полная расходимость практически мало превосходит дифракционную составляющую расходимости $\varphi_{\text{диф}}$.

Исследование временных характеристик излучения показало, что в лазерных системах с длинными и открытым резонаторами длительность импульса уменьшалась, соответственно, в 1,5 и 2 раза. При этом наблюдались регулярные пульсации с периодом $\tau_{\text{п}} = 2L/c = 1,33$ мкс. Нужно отметить, что на начальном этапе излучения в режиме самосинхронизации продольных мод [6] импульс гладкий, а пульсации возникают в лазерной системе с длинным резонатором через 10^{-3} с, а с открытым резонатором – через $1,2 \times 10^{-3}$ с.

Наиболее вероятным механизмом, обеспечивающим режим синхронизации мод, является механизм, связанный с самомодуляцией излучения за счет нелинейности показателя преломления активного элемента 2. Нелинейный набег фазы при прохождении импульса излучения через активный элемент 2 достаточен для модуляции дифракционных потерь резонатора, что приводит к амплитудной модуляции добротности и может вызывать самосинхронизацию мод в лазере с длинным резонатором [10].

В процессе эксперимента была показана возможность наведения лазерного излучения сразу на несколько объектов. Так, при наведении свертлюминесцентного излучения одновременно на три объекта возникала генерация в телесном угле, определяемом апертурой активного элемента резонатора.

В направлении на каждый из объектов – ФЭУ, объектив, катафот формировался отдельный лазерный луч, интенсивность которого зависела от коэффициента отражения исследуемых объектов. Причем при выгорании под действием лазерного излучения поверхности фотокатода одного из объектов (ФЭУ) энергия излучения перераспределялась на два других зеркальных объекта. При перемещении объектов лазерные лучи перемещались вслед за объектом и не пропадали до тех пор, пока объекты не выходили из зоны видимости.

Лазерная система связи с открытым резонатором работает почти безынерционно. Скорость наведения в ждущем режиме системы определяется скоростью распространения лазерного излучения и двойным расстоянием до объектов, на которые наводится лазерное излучение. Точность наведения практически безошибочна и определяется возникновением генерации лазерного излучения при отражении от объектов люминесцентного излучения, которое возникает при накачке активного элемента. В результате экспериментов было установлено, что диаметр пятна сфокусированного лазерного излучения на объектах исследования был соизмерим с диаметром пятна излучения, получаемого с помощью лазерной системы связи, имеющей устойчивый полуконцентрический резонатор и работающей на основной моде с минимальными дифракционными потерями. Этот размер, как известно, определяется соотношением [9]: $(\lambda L / \pi)^{1/2}$, где L – расстояние до объекта. Точность определения диаметра пятна фокусировки зависит от точности компенсации дифракционных потерь в резонаторе и составляет 2–3%.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены свойства атмосферной лазерной системы связи с открытым резонатором и обращающим волновой фронт отражателем.
2. Проведены теоретические оценки возможности возникновения генерации лазерного излучения в системе связи с открытым резонатором для достижения надежной связи между передающей и приемной станциями.
3. Экспериментальные исследования подтвердили возможность создания самофокусирующей многолучевой безынерционной самонаводящейся атмосферной лазерной системы связи с компенсацией фазовых искажений на пути между движущимися передающей и приемной станциями

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чепусов Е. Н. Лазерная связь – новый экономический способ беспроводной связи / Е. Н. Чепусов, С. Г. Шаронин // Сети и Системы связи. – 1997. – № 2. – С. 31–36.
2. Сироклин И. Л. ДЕСТ – последняя миля + мобильность / И. Л. Сироклин // Информост. Средства связи. – 2001. – № 2(15). – С. 24–27.

3. Серопегин В. И. Беспроводные системы передачи данных локального, городского и регионального масштабов / В. И. Серопегин // Технология и средства связи. – 1999. – № 4. – С. 72–77.
4. Кулик Т. К. Методика сравнительной оценки работоспособности лазерных линий связи / Т. К. Кулик, Д. В. Прохоров // Технология и средства связи. – 2000. – № 1 – С. 8–18.
5. Кулик Т. К. Особенности применения оптических линий связи / [Т. К. Кулик, Д. В. Прохоров, В. В. Сумерин, А. П. Хюппенен] // Лазер Информ. – 2001. – Вып. 9, 10 (216–217). – С. 1–6.
6. Власов Д. В. / [Д. В. Власов, В. Б. Колосов и др.] // Квантовая электроника. – 1981. – № 6. – С. 325 – 361.
7. Зельдович Б. Я. / Б. Я. Зельдович, В. В. Шкунов // В мире науки. – 1986. – № 2. – С. 16 – 23.
8. Патент Украины № 14570. 1997. Бюллетень № 2 // Титар В. Лазерный пристрій.
9. Звелто О. Принципы лазеров / О. Звелто. – М. : Мир, 1989. – 138 с.
10. Titar', V.P. Some properties of open-resonator laser systems // Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika). – 1998. – V. 52, № 9. – P. 80-87.