

ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.396.96: 621.38

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ЛАЗЕРОВ В РАДИОФОТОННЫХ СИСТЕМАХ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

© 2023 г. С. А. Покотило^{1,*}, Д. М. Ненадович¹, А. В. Ефремов¹

¹Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

*E-mail: era_1@mil.ru

Поступила в редакцию 10.10.2023 г.

После доработки 10.10.2023 г.

Принята к публикации 10.10.2023 г.

Проанализированы возможности применения широкополосных лазеров в качестве источников оптических несущих частот в волоконно-оптических и атмосферных оптических системах связи. Показано, что применение широкополосных лазеров в системах оптической связи позволяет существенно повысить их помехоустойчивость и плотность (объем) передаваемых сообщений.

DOI: 10.56304/S2782375X23010114

ВВЕДЕНИЕ

Прогресс развития техники оптической связи и передачи информации, наблюдаемый в последнее время, связан в первую очередь с широким использованием волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) и атмосферных оптических систем связи и освоением новых спектральных диапазонов оптического излучения [1–4]. Основу современных ВОСП информации составляют волоконно-оптические кабели на основе кварцевого стекла, имеющего три окна прозрачности с центрами на длинах волн 850, 1330 и 1550 нм соответственно. В качестве оптических передатчиков наибольшее распространение получили полупроводниковые лазеры на основе арсенида галлия и различных полупроводниковых гетероструктур на его основе. Однако традиционные ВОСП в настоящее время подходят к своим теоретическим пределам, что является причиной поиска новых материалов для изготовления оптических волокон с более низкими, чем у кварца, значениями коэффициента затухания, новых спектральных диапазонов для повышения эффективности функционирования как ВОСП, так и атмосферных оптических систем связи, и новых схемных решений более эффективных лазерных передатчиков.

Цель работы — оценка возможностей повышения помехоустойчивости радиофотонных волоконно-оптических и атмосферных оптических систем передачи, увеличения объема (плотности) передаваемых информационных сигналов и снижения массо-габаритных размеров передающих частей оптических систем передачи за счет применения широкополосных лазеров.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН выполнен цикл работ по разработке и исследованию характеристик широкополосных лазерных ИК-излучателей. Молекулярные газовые лазеры обеспечивают [4–9]:

- высокую мощность в среднем ИК-диапазоне;
- высокое качество лазерного пучка;
- многочастотный спектр.

Многочастотность широкополосного лазера достигается за счет реализации пространственно распределенной обратной связи оптического резонатора благодаря применению отражательных брэгговских дифракционных решеток в качестве непрозрачного зеркала резонатора.

Созданные лазеры генерируют ИК-излучение на обертоновых (колебательных и вращательных) переходах молекулы CO, а также созданы гибридные установки с использованием CO- и CO₂-лазеров и различных нелинейных кристаллов, генерирующие на суммарных и разностных частотах при различных значениях угла фазового синхронизма, что позволило получить множество спектральных линий в спектральных диапазонах излучения лазеров. Так, создана широкополосная гибридная лазерная система на базе CO- и CO₂-лазеров с нелинейными кристаллами, излучающая в спектральном диапазоне длин волн от 1.7 до 19.3 мкм:

- 4.8–8.2 мкм — основной спектральный диапазон излучения CO-лазера;
- 2.0–4.2 мкм — обертоновый спектральный диапазон CO-лазера;

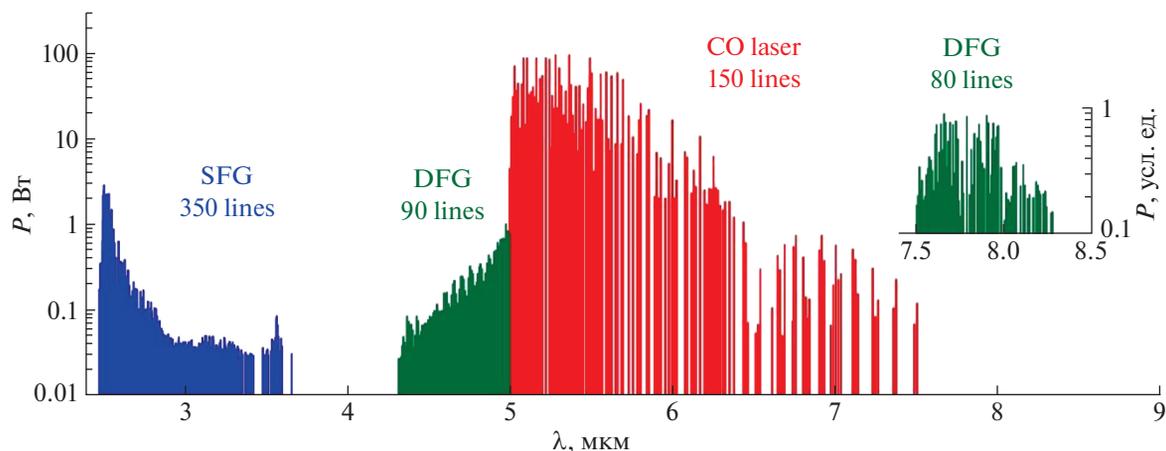


Рис. 1. Фрагмент лазерных спектральных линий, полученных в результате двухкаскадного преобразования излучения СО-лазера в кристалле ZnGaP (SFG, DFG – спектральные линии генерации суммарных и разностных частот соответственно).

– 9.2–10.8 мкм – основной спектральный диапазон излучения СО₂-лазера;

– 2.45–3.2 мкм – спектральный диапазон генерации суммарных частот излучения СО-лазера;

– 3.3–3.8 мкм – спектральный диапазон генерации суммарных частот излучения СО- и СО₂-лазеров;

– 1.7–1.9 мкм – спектральный диапазон генерации третьей гармоники СО-лазера;

– 12–19.3 мкм – спектральный диапазон генерации разностных частот излучения СО- и СО₂-лазеров.

В частности, в спектральном диапазоне от 2.5 до 3.9 мкм на 28 колебательных полосах получено более 100 лазерных спектральных линий с КПД 1.6% и максимальной средней мощностью 1.9 Вт. Этого удалось достичь на молекулярном газовом лазере, обеспечивающем высокую мощность в среднем ИК-диапазоне, высокое качество лазерного пучка и многочастотный спектр; с помощью нелинейного кристалла удалось получить оптические волны суммарной и разностной частоты и оставшееся излучение накачки на выходе. В качестве нелинейных кристаллов были использованы одноосные кристаллы ZnGeP₂, GaSe, PbIn₆Te₁₀, AgGaSe₂ без просветляющего покрытия.

Двухкаскадное преобразование излучения СО-лазера в кристалле ZnGeP₂ позволило получить, в частности, в спектральном диапазоне от 4.9 до 7.5 мкм при мощности излучения от 0.1 до 50 Вт ~150 спектральных линий, а в кристалле AgGaSe₂ – в спектральном диапазоне от 4.85 до 7.5 мкм при мощности излучения от 1 до 50 Вт ~60 спектральных линий; в спектральном диапазоне от 2.5 до 2.8 мкм при мощности излучения от 10⁻³ до 0.5 Вт ~70 спектральных линий.

На рис. 1 в качестве примера приведен фрагмент лазерных спектральных линий, полученных в результате двухкаскадного преобразования излучения СО-лазера в кристалле ZnGaP в спектральных диапазонах 2.5–3.6 и 4.3–8.25 мкм [4].

На рис. 2 приведен пример двухкаскадного преобразования излучения СО-лазера в кристалле AgGaSe₂ в спектральных диапазонах 2.3–2.9 мкм (SFG), 4.4–6.1 мкм (DFG). При этом в диапазонах SFG и DFG получено приблизительно по 70 спектральных линий генерации, а в диапазоне 4.9–6.5 мкм – 60 спектральных линий [4].

Создан компактный СО-лазер с высококачественной накачкой, который при мощности излучения от 3 до 40 Вт в спектральном диапазоне от 5.0 до 6.5 мкм обеспечил получение ~70 спектральных линий.

В результате внутривибраторного преобразования на кристалле BaGa₂GeSe₆ в спектре излучения СО-лазера получено 63 спектральных линии при средней мощности излучения 31 мВт в спектральном диапазоне от 4.9 до 5.9 мкм и 170 спектральных линий при средней мощности 0.8 мВт в спектральном диапазоне от 2.48 до 2.95 мкм.

Появление описанных лазеров открывает широкие перспективы для создания атмосферных и волоконно-оптических систем связи. Так, применение широкополосных лазерных излучателей ИК-диапазона позволяет значительно увеличить дальность связи по сравнению с видимым спектральным диапазоном. Что касается ВОСП, то следует отметить, что в настоящее время созданы оптические волокна с низким затуханием в ИК-диапазоне, что в сочетании с широкополосными ИК-лазерами также открывает перспективы не только увеличения дальности действия ВОСП, но и позволяет существенно повысить по-

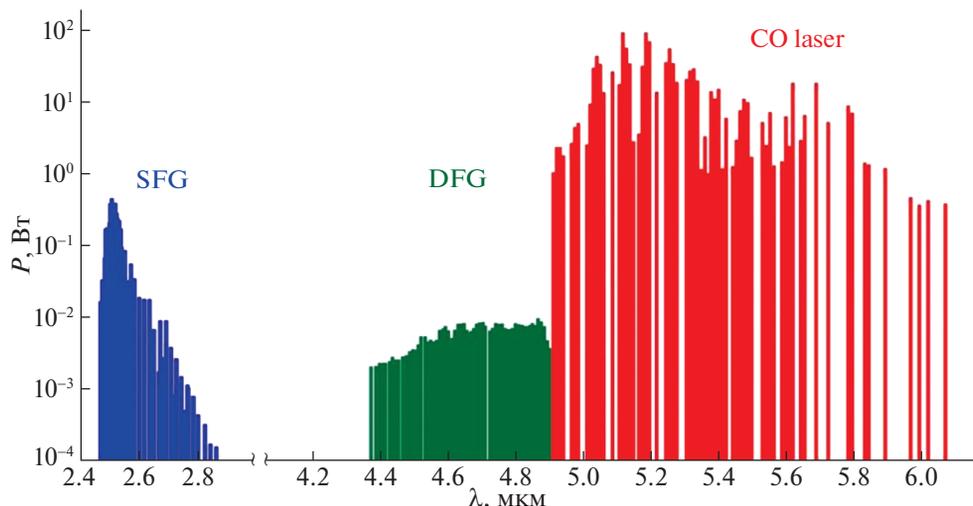


Рис. 2. Фрагмент лазерных спектральных линий, полученных в результате двухкаскадного преобразования излучения CO-лазера в кристалле AgGaSe_2 .

мехоустойчивость и объемы передаваемой информации. В качестве примера на рис. 3 приведены зависимости коэффициента затухания оптических волокон в ИК-диапазоне [3, 10], которые превосходят аналогичные характеристики традиционных оптических волокон из кварца для видимого диапазона оптического излучения [1, 2, 4].

СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ РАДИОФОТОННОЙ ВОСП НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО ЛАЗЕРА

Известные ВОСП информации содержат последовательно соединенные оптический передатчик, оптическую среду передачи оптического сигнала, например, в виде оптического кабеля,

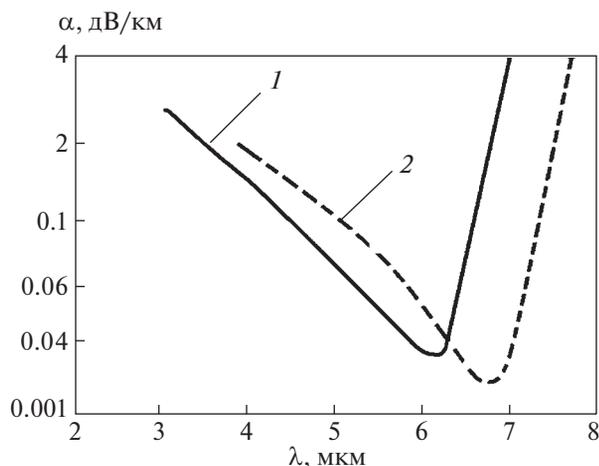


Рис. 3. Спектральные зависимости оптических потерь стекол на основе As_2S_3 (1) и As_2Se_3 (2).

оптоэлектронный приемник и оконечное устройство. Так, цифровая система оптической связи, описанная в [11], включает в себя электрооптический модулятор и оптический передатчик, оптоэлектронный приемник, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифровой демодулятор, соединенные последовательно, при этом оптический выход модулятора и вход оптоэлектронного приемника соединены волоконно-оптическим кабелем.

Недостатками известных ВОСП являются использование оптического излучения одной несущей частоты для передачи и приема информационных широкополосных радиосигналов, что не обеспечивает требуемого отношения сигнал/шум в принимаемом сообщении. Для использования нескольких разных несущих частот требуется использование нескольких лазеров, что существенно увеличивает массо-габаритные показатели и является особенно критичным для бортовых, в частности авиационных, систем связи. Кроме того, по сравнению с современным уровнем развития может быть существенно повышен объем передаваемой информации.

Новые схемные решения рассмотрим на примере двух вариантов радиофотонных ВОСП.

1. Для повышения помехоустойчивости в радиофотонную волоконно-оптическую систему связи, включающую в себя последовательно соединенные оптический передатчик, электрооптический модулятор, оптоэлектронный приемник, АЦП и цифровой демодулятор, в которой оптический выход модулятора и вход оптоэлектронного приемника соединены волоконно-оптическим кабелем, введены оптический разветвитель, $(n-1)$ электрооптических модуляторов,

оптический соединитель и электронный сумматор, в качестве оптического передатчика использован широкополосный лазер, излучающий на n длинах волн, выход которого соединен со входами n электрооптических модуляторов с помощью волоконно-оптического кабеля, содержащего n оптических волокон, по числу n длин волн излучения широкополосного лазера, оптоэлектронный приемник выполнен матричным с n чувствительными элементами, n выходов электрооптических модуляторов с помощью волоконно-оптического кабеля оптически сопряжены с n чувствительными элементами оптоэлектронного приемника, выходы которого соединены с многоканальным входом сумматора, выход которого соединен со входом АЦП, соединенного с цифровым демодулятором, на оптические входы электрооптических модуляторов подаются оптические несущие n длин волн, а на модулирующие входы n электрооптических модуляторов параллельно подается один и тот же информационный широкополосный радиосигнал. Количество электрооптических модуляторов, количество чувствительных элементов оптоэлектронного приемника, количество оптических волокон в оптоволоконном кабеле, соединяющем блок модуляторов с выходом лазера, и количество оптических волокон в оптоволоконном кабеле, соединяющем выходы электрооптических модуляторов с чувствительными элементами матричного оптоэлектронного приемника, равно количеству длин волн излучения широкополосного лазера. Использование n несущих частот оптического излучения для передачи одного (ответственного) информационного сигнала обеспечивает увеличение отношения сигнал/шум в информационном сообщении на выходе сумматора в корень квадратный из n раз.

2. Для увеличения плотности передачи информации в радиофотонную волоконно-оптическую систему связи, включающую в себя последовательно соединенные оптический передатчик, электрооптический модулятор, оптоэлектронный приемник, АЦП и цифровой демодулятор, введены два оптических разветвителя, $(n-1)$ электрооптических модуляторов, в качестве оптического передатчика использован широкополосный лазер, излучающий на n длинах волн, АЦП и цифровой демодулятор выполнены многоканальными, выходы широкополосного лазера соединены со входами n электрооптических модуляторов с помощью волоконно-оптического кабеля, содержащего n оптических волокон, по числу n длин волн излучения широкополосного лазера, оптоэлектронный приемник выполнен матричным с n чувствительными элементами, n выходов электрооптических модуляторов с помощью волоконно-оптического кабеля оптически сопряжены с n чувствительными элементами оптоэлектронного

приемника, выходы которого соединены со входами многоканального АЦП, соединенного с многоканальным цифровым демодулятором, на оптические входы электрооптических модуляторов подаются оптические несущие n разных длин волн, а на модулирующие (электрические) входы n электрооптических модуляторов параллельно подаются n разных информационных сигналов.

При этом в заявляемых вариантах радиофотонной волоконно-оптической системы связи количество электрооптических модуляторов, количество чувствительных элементов оптоэлектронного приемника, количество оптических волокон в волоконно-оптическом кабеле, соединяющем блок модуляторов с выходом лазера, и в волоконно-оптическом кабеле, соединяющем выходы электрооптических модуляторов с чувствительными элементами матричного оптоэлектронного приемника, равно количеству длин волн излучения широкополосного лазера.

Электронный сумматор представляет собой линейный аналоговый сумматор, суммирующий сигналы линейно, а внутренние шумы – среднеквадратично, в результате чего отношение сигнал/шум в принимаемом сообщении на выходе сумматора увеличивается в \sqrt{n} , где n – количество суммируемых сигналов, смешанных с аддитивными внутренними шумами матричного оптоэлектронного приемника.

Радиофотонная волоконно-оптическая система связи в первом варианте иллюстрируется функциональной схемой, изображенной на рис. 4, которая включает в себя следующие функциональные элементы [12]: 1 – широкополосный лазер, 2, 6 – волоконно-оптический кабель, 3, 7 – оптический разветвитель, 4 – источник информационного широкополосного радиосигнала u , 5 (5.1, ..., 5. n) – блок n электрооптических модуляторов, 8 (8.1, ..., 8. n) – матричный оптоэлектронный приемник, 9 – электронный сумматор, 10 – многоканальный АЦП, 11 – цифровой демодулятор. При этом широкополосный лазер, оптический разветвитель, блок n электрооптических модуляторов и оптоэлектронный приемник связаны оптически, в том числе с помощью волоконно-оптического кабеля 2, 6, содержащего n оптических волокон по числу n длин волн излучения широкополосного лазера, а оптоэлектронный приемник, электронный сумматор, АЦП и цифровой демодулятор соединены электрически, оптоэлектронный приемник выполнен матричным с n чувствительными элементами, n выходов электрооптических модуляторов с помощью волоконно-оптического кабеля оптически сопряжены с n чувствительными элементами оптоэлектронного приемника, выходы которого соединены с многоканальным входом сумматора, выход которого соединен со входом АЦП, соединенного с

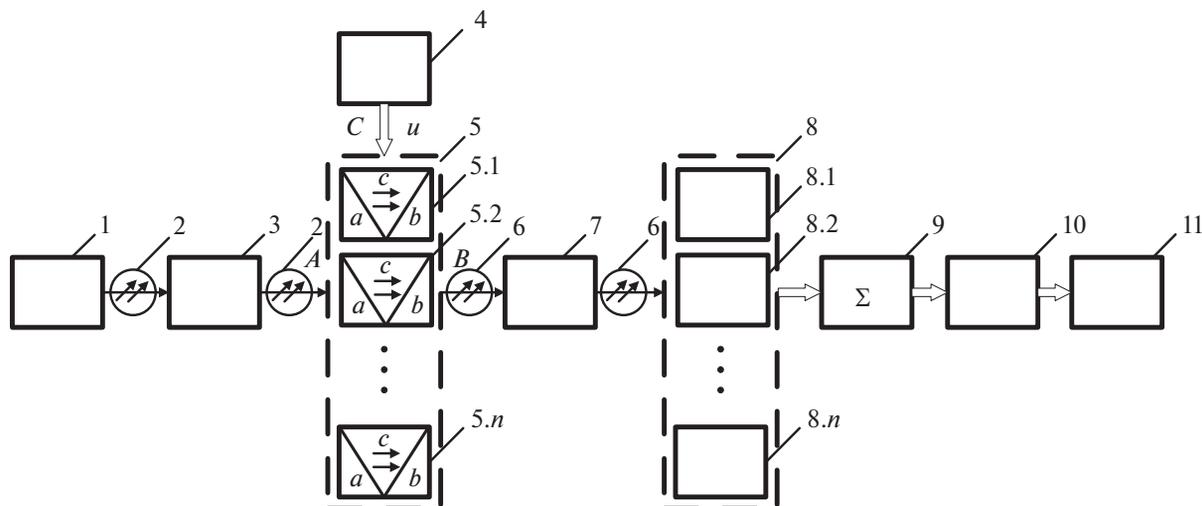


Рис. 4. Радиофотонная волоконно-оптическая система связи с повышенной помехоустойчивостью: 1 – широкополосный лазер, 2, 6 – волоконно-оптический кабель, 3, 7 – оптический разветвитель, 4 – источник информационного широкополосного радиосигнала u , 5 (5.1, ..., 5.n) – блок n электрооптических модуляторов, 8 (8.1, ..., 8.n) – матричный оптоэлектронный приемник, 9 – электронный сумматор, 10 – многоканальный АЦП, 11 – цифровой демодулятор.

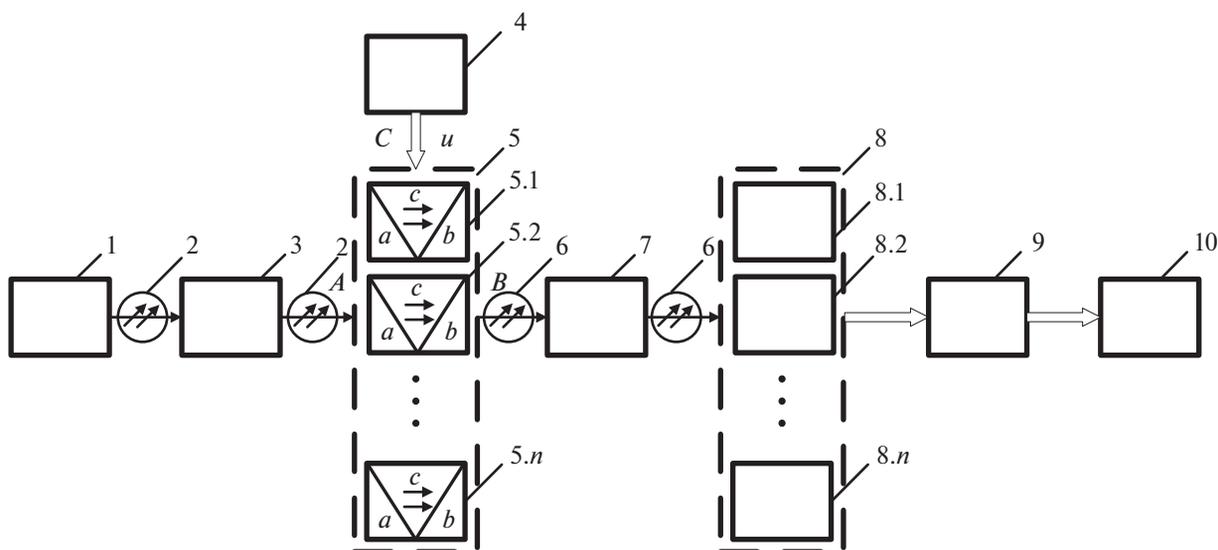


Рис. 5. Радиофотонная волоконно-оптическая система связи с повышенной плотностью передачи информации: 1 – широкополосный лазер, 2, 6 – волоконно-оптический кабель, 3, 7 – оптический разветвитель, 4 – источник информационного широкополосного радиосигнала u , 5 (5.1, ..., 5.n) – блок n электрооптических модуляторов, 8 (8.1, ..., 8.n) – матричный оптоэлектронный приемник, 9 – многоканальный АЦП; 10 – цифровой демодулятор.

цифровым демодулятором, а на модулирующие (электрические) входы n электрооптических модуляторов параллельно подается один и тот же информационный широкополосный радиосигнал u .

Радиофотонная волоконно-оптическая система связи во втором варианте иллюстрируется функциональной схемой, изображенной на рис. 5 [12]. Она включает в себя следующие функциональные элементы: 1 – широкополосный лазер, 2, 6 – волоконно-оптический кабель, 3, 7 – опти-

ческий разветвитель, 4 – источник информационного широкополосного радиосигнала u , 5 (5.1, ..., 5.n) – блок n электрооптических модуляторов, 8 (8.1, ..., 8.n) – матричный оптоэлектронный приемник, 10 – многоканальный АЦП, 11 – цифровой демодулятор. При этом связи между функциональными элементами схемы аналогичны связям, описанным для функциональной схемы рис. 4, из рассматриваемой схемы исключен электронный сумматор, а на модулирующие входы n

электрооптических модуляторов параллельно подаются n разных информационных широкополосных радиосигналов, которые можно представить в виде вектора-столбца $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_n)^T$, где “ T ” — знак транспонирования.

Радиофотонная волоконно-оптическая система связи (в обоих вариантах) работает следующим образом. Лазерное излучение широкополосного лазера 1, состоящее из n длин волн, с помощью волоконно-оптического кабеля 2, состоящего из n оптических волокон, и оптического разветвителя 3, промодулированное информационным сигналом 4 в блоке n электрооптических модуляторов 5, на n длинах волн по волоконно-оптическому кабелю 6 с помощью разветвителя 7 поступает параллельно на n чувствительных элементов 8.1, ..., 8. n матричного оптоэлектронного приемника 8, преобразующего лазерное излучение в электрический сигнал.

В электронном сумматоре 9 выполняется линейное суммирование полезных сигналов и среднеквадратичное суммирование внутренних шумов, в результате чего отношение сигнал/шум в принятом сообщении повышается в корень квадратный из количества чувствительных элементов n приемника. АЦП 10 преобразует информационный сигнал в цифровую форму и демодулируется в цифровом демодуляторе 11, выходной сигнал которого подвергается дальнейшей обработке (например, автоматическому распознаванию или декодированию).

При использовании источника n разных информационных сигналов (второй вариант волоконно-оптической системы связи) за счет использования n оптических несущих, генерируемых широкополосным лазером, достигают увеличения плотности передачи информации в n раз. С учетом того что достигнутая в 2020 г. скорость передачи сигнала по одной оптической несущей частоте составила 255 Тбит/с [10], при использовании нескольких десятков-сотен несущих с помощью созданных к настоящему времени широкополосных лазеров скорость передачи может быть увеличена еще на 1.5–2.5 порядка. Например, благодаря применению широкополосного лазера, излучающего на 144 длинах волн, и 144-волоконного оптического кабеля достигают увеличения отношения сигнал/шум в принимаемом сообщении в 12 раз, а увеличения плотности передачи информации — в 144 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданные к настоящему времени широкополосные лазеры, излучающие в спектральном ИК-диапазоне от 1.7 до 20 мкм [4–9], а также волоконно-оптические кабели, обеспечивающие коэффициент затухания в ИК-диапазоне менее 0.1 дБ/км [3], открывают широкие перспективы создания высокоэффективных магистральных волоконно-оптических систем передачи информации.

Применение широкополосных ИК-лазеров позволяет существенно повысить помехоустойчивость систем оптической связи за счет увеличения отношения сигнал/шум в принимаемом сообщении и объем передаваемой информации за счет увеличения плотности передаваемых сообщений. Кроме того, применение одного широкополосного, многочастотного, лазера вместо n одночастотных лазеров для передачи информационных сигналов позволяет существенно снизить массо-габаритные параметры передающей части ВОСП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. www.sphotonics.ru
2. www.asimp.ru
3. Ларин Ю.Т. Стекла для изготовления оптических волокон и кабелей. АО “ВНИИ КП”. Портал “Радиоэлектроника и телекоммуникации”. [www.infomost](http://www.infomost.com), [www.hieperline](http://www.hieperline.com), [www.lean/theorya-prakt](http://www.lean/theorya-prakt.com)
4. Ионин А.А., Киняевский И.О., Климачев Ю.М. и др. // Всеросс. форум с междунар. участием “Академические Жуковские чтения”, 23–25 ноября 2021, Воронеж. Материалы форума. Воронеж: ВУНЦ ВВС “ВВА”. 2022. Ч. 3.
5. Budilova O.V., Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O. et al. // Opt. Lett. 2016. № 41. P. 777.
6. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Yu.M. et al. // Laser Phys. 2018. № 28. P. 025401.
7. Ionin A.A., Badikov D.V., Badikov V.V. et al. // Opt. Lett. 2018. № 43. P. 4358.
8. Budilova O.V., Ionin A. A., Kinyaevskiy I.O. et al. // Opt. Commun. 2016. № 363. P. 26.
9. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Yu.M. et al. // Opt. Express. 2019. V. 27. № 17. P. 24353.
10. Создано оптоволокно с пропускной способностью до 255 Тбит/с // Лента.ру (дата обращения: 22.08.2022).
11. Волков С.А., Овсянкин С.В. // Техника радиосвязи. 2016. № 1. С. 64.
12. Покотило С.А., Лобков Ю.Л., Ненадович Д.М., Ефремов А.В. // Заявка на изобретение № 2022112545, Российская Федерация, МПК H04N 7/00, H04N 10/00. Радиофотонная волоконно-оптическая система связи (варианты); заявл. 05.05.2022.