

КВАНТОВО-КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ В АТМОСФЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ (Обзор)**П. И. Абрамов, А. С. Бударин, Е. В. Кузнецов, Л. А. Скворцов***

УДК 621.373.8

*АО НИИ “Полюс” им. М. Ф. Стельмаха,
117342, Москва, Россия; e-mail: lskvortsov@gmail.com**(Поступила 22 апреля 2020)*

Проанализированы параметры перспективных образцов атмосферных оптических линий связи (АОЛС) на базе квантово-каскадных лазеров (ККЛ) по сравнению с существующими коммерческими системами. Результаты свидетельствуют о существенных преимуществах применения ККЛ в АОЛС по сравнению с имеющимися системами, в значительной степени обусловленных длинноволновым излучением и особенностью динамики модуляции ККЛ, которая ограничена пикосекундным временем жизни носителей тока, что обеспечивает принципиальную возможность получения собственной полосы пропускания ≥ 100 ГГц. С учетом экспериментальных данных и уникальных свойств излучения ККЛ обсуждаются возможные области применения АОЛС на базе ИК ККЛ и терагерцевых ККЛ, а также использование нетрадиционных методов для устранения влияния турбулентности и повышения емкости канала передачи информации.

Ключевые слова: атмосферные оптические линии связи, квантово-каскадные лазеры, атмосферная турбулентность, “закрученный” свет.

The paper provides analysis of parameters of prospective samples of atmospheric optical communication lines, or free space optics (FSO), based on quantum-cascade lasers (QCL) compared to existing commercial systems. The results indicate significant advantages of using QCL in FSO compared to existing systems, largely due to long-wave radiation and the feature of QCL modulation dynamics, which is limited by the picosecond lifetime of current carriers that provides a fundamental possibility of obtaining inherent bandwidth of ≥ 100 GHz. Possible applications of FSO based on IR QCL and terahertz QCL are discussed taking into account experimental data and unique properties of QCL radiation. The use of non-traditional methods to eliminate the influence of turbulence and increase the capacity of the information transmission channel is also discussed.

Keywords: atmospheric optical communication lines, free space optics (FSO); quantum-cascade lasers; atmospheric turbulence; “twisted” light.

Содержание*Введение.**Свойства излучения ККЛ, определяющие возможность их применения в АОЛС.**Общие закономерности прохождения лазерного излучения через атмосферу.**Поглощение. Окна прозрачности.**Общие вопросы, связанные с рассеянием света. Эмпирическая модель Крузе.**Атмосферная турбулентность.**Выбор длины волны источника излучения для АОЛС.**Краткие сведения об источниках излучения и фотоприемниках, используемых в коммерческих АОЛС.***QUANTUM-CASCADE LASERS IN ATMOSPHERIC OPTICAL COMMUNICATION LINES: CHALLENGES AND PROSPECTS (Review)****P. I. Abramov, A. S. Budarin, E. V. Kuznetsov, L. A. Skvortsov*** (*JSC Polyus Research Institute of M. F. Stelmakh, Moscow, 117342, Russia; e-mail: lskvortsov@gmail.com*)

* Автор, с которым следует вести переписку.

*Экспериментальное обоснование выбора длины волны источника излучения для АОЛС.
Примеры практической реализации АОЛС на базе ИК ККЛ.*

АОЛС на базе ИК ККЛ.

Перспективы и возможные области применения АОЛС на базе терагерцовых ККЛ.

Нетрадиционные методы устранения влияния турбулентности и повышение информационной емкости канала передачи.

Заключение.

Введение. В последние десятилетия открытые оптические системы передачи — атмосферные оптические линии связи (АОЛС) — стали важным направлением применения оптоэлектронной техники. Для получения широкополосного канала связи используют высокочастотные модулированные световые импульсы для передачи данных через атмосферу [1—7]. Работая в спектре ИК излучения, АОЛС может обеспечивать связь с очень высокой скоростью передачи данных (десятки гигабит в секунду) между различными платформами, расположенными в нескольких километрах вблизи уровня моря или >100 км на большой высоте [4].

АОЛС отличаются от других систем передачи только особенностями построения линейного тракта, который включает в себя среду распространения и совокупность технических средств, обеспечивающих формирование, передачу, распределение, преобразование и обработку оптических сигналов в одной и той же полосе частот или с одной и той же пропускной способностью, определяемых номинальным числом каналов передачи.

Наиболее важные преимущества технологии АОЛС [4]: используемые частоты излучения не подпадают под формальное регулирование; высокие скорости передачи до 10 Гбит/с; отсутствие помех с другими линиями передачи данных (нечувствительность к электромагнитным помехам); быстрая, недорогая и простая установка; высокая защищенность от перехвата и к помехам (повышенная степень защиты информации, безопасность и живучесть); настраиваемая пользователем пропускная способность с возможностью изменения конфигурации канала передачи данных; коммерческая доступность. Вместе с тем оптические компоненты АОЛС обладают повышенной чувствительностью к воздействию метеоявлений. Анализ факторов, определяющих условия функционирования средств связи, преимуществ и недостатков АОЛС в первую очередь перед радиоэлектронными средствами, позволяет сформулировать основные направления их внедрения.

Важными приложениями систем АОЛС являются, например, специальная мобильная связь во время кризисных ситуаций, так называемые “последние мили” для связи в городских районах (например, при преодолении водных преград), передача данных между движущимися объектами как друг с другом, так и с Землей, например, между летательными и космическими аппаратами, судами и т. д. (рис. 1). Особое значение АОЛС приобретает при ведении боевых действий и в локальных конфликтах, а также при проведении антитеррористических операций. Показано, что командный центр сможет скрытно передавать информацию транспортным средствам или военнослужащим на расстоянии “линии визирования” со скоростью передачи от 25 Мбит/с до 1.25 Гбит/с [4].

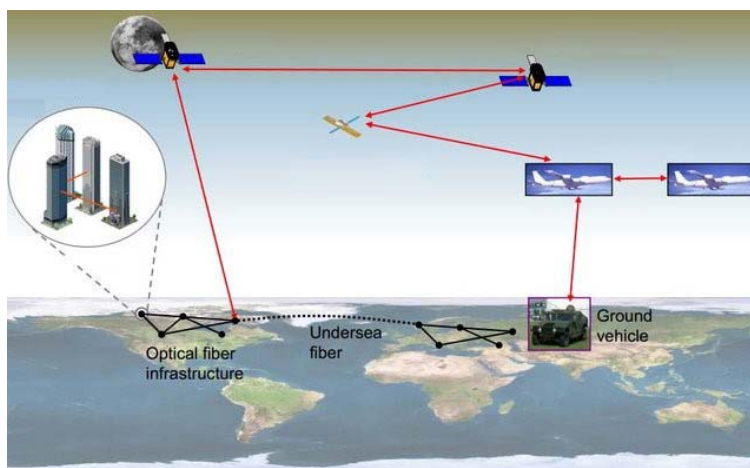


Рис. 1. Пример применения систем АОЛС [3]

Цель настоящей работы — критический анализ возможности построения АОЛС на базе квантово-каскадных лазеров (ККЛ) и перспектив их применения для решения конкретных задач, исходя из специфических свойств излучения ККЛ. В отличие от относительно небольшого числа обзоров по этой тематике [5, 6] в данной работе рассматриваются проблемы и перспективы построения АОЛС на базе как ИК ККЛ, так и ККЛ, работающих в терагерцовом диапазоне (ТГц ККЛ), и обосновываются возможные области их применения. Обсуждаются принципиальная возможность применения нетрадиционных методов устранения влияния турбулентности и повышения информационной емкости канала передачи, а также проблемы, стоящие на пути их реализации для систем АОЛС на базе ККЛ. Кратко затронуты общие вопросы, касающиеся характеристик передачи по оптическому каналу, поскольку их изучению посвящено большое количество статей и монографий [4, 8—12].

Свойства излучения ККЛ, определяющие возможность их применения в АОЛС. Рассмотрению физических принципов работы ККЛ посвящено значительное количество работ (см., например, [13—24]). Акцентируем внимание на уникальных свойствах излучения ККЛ, которые во многом определяют возможность их применения в АОЛС.

В окнах прозрачности атмосферы 3—5 и 8—12 мкм излучение ИК ККЛ распространяется с минимальными потерями, определяемыми молекулярным спектрально-селективным поглощением. То же можно сказать и об излучении ТГц ККЛ в соответствующих микроокнах прозрачности, пропускание которых сильно зависит от наличия водяных паров в атмосфере. По сравнению с видимым, ближним ИК (NIR) или коротковолновым ИК (SWIR) диапазонами излучение ККЛ более устойчиво к возмущениям (турбулентности) в атмосфере в силу большей длины волны. Малое время жизни электрона (<1 пс) в возбужденном состоянии внутри квантовых ям ККЛ обеспечивает высокую рабочую частоту и определяет предельную частоту модуляции до 100 ГГц, что делает возможным создание АОЛС с очень высокой пропускной способностью. С точки зрения потерь при наведении увеличение расходимости луча ($\sim \lambda/d$) делает АОЛС на базе ККЛ более привлекательными, чем при использовании лазеров, работающих в NIR и SWIR диапазонах.

ККЛ нашли широкое практическое применение в области обороны [25—32], безопасности [33—40], медицины и биологии [41—46], мониторинга окружающей среды [47—52], ИК спектроскопии [53—61].

Общие закономерности прохождения лазерного излучения через атмосферу. *Поглощение. Окна прозрачности.* Прохождение лазерного излучения через атмосферу зависит от ее состава. Атмосфера состоит из различных видов молекул газообразных веществ (молекул воды, кислорода, диоксидов углерода, азота и др.), аэрозолей (тумана, смога и дыма, продуктов выделения лесов и растений, пыли, частиц морской соли, почвы, вулканического происхождения и микрочастиц иного происхождения), частиц льда и капель воды. В связи с этим атмосфера вызывает ослабление оптических сигналов за счет поглощения и рассеяния. Для больших расстояний необходимо учитывать реальное состояние атмосферы и связанные с ним зависимости поглощения и рассеяния света от длины волны лазерного излучения, а также наличие в ней “окон прозрачности” [62] (рис. 2, 3).

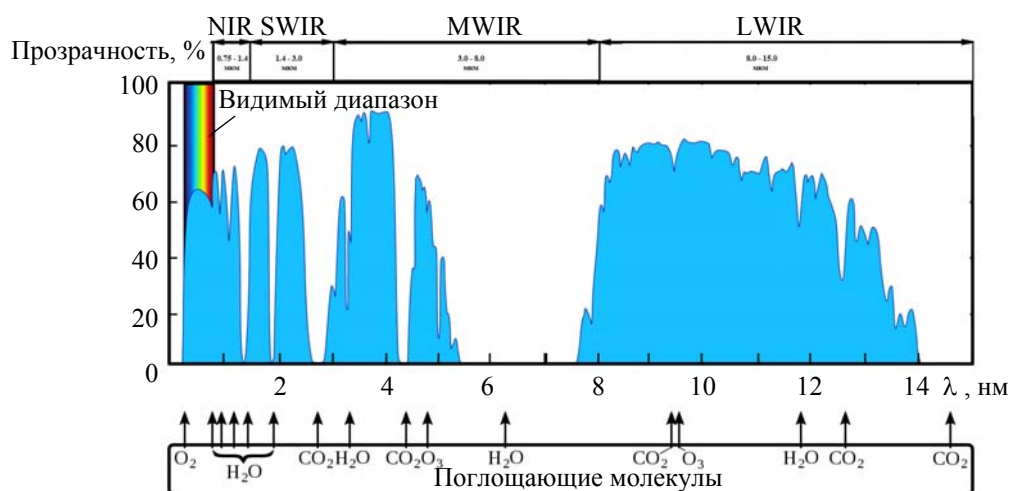


Рис. 2. Область прозрачности атмосферы в среднем ИК диапазоне [62]

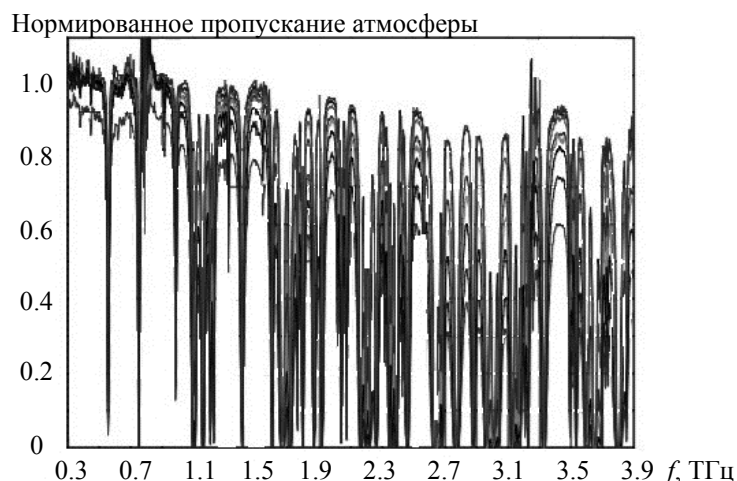


Рис. 3. Нормированное спектральное пропускание атмосферы (0.3—4.0 ТГц) при относительной влажности от 5 (верхняя часть) до 58 % (нижняя часть) для атмосферных окон: 1.47—1.56, 1.96—2.0, 2.09—2.12, 2.51—2.55 и 3.39—3.47 ТГц; спектральное разрешение 0.15 см^{-1} [63]

В нижних слоях атмосферы поглощением ИК излучения оксидом азота и оксидом углерода обычно можно пренебречь, что позволяет определить положение двух окон прозрачности атмосферы в областях средневолнового (3.5—5 мкм (MWIR)) и длинноволнового (8—14 мкм (LWIR)) ИК излучения, пропускание которых практически не зависит от изменения относительной влажности. Поэтому длины волн ИК ККЛ, входящих в состав АОЛС, выбирают из указанных диапазонов электромагнитного спектра.

В ТГц диапазоне существует множество линий поглощения различных газов — составляющих атмосферного воздуха, главным образом водяного пара. Именно его влияние ограничивает возможности применения ТГц излучения на больших расстояниях в первую очередь из-за сильной вариации интенсивности линий поглощения водяных паров при изменении влажности воздуха. В то же время на расстояниях до нескольких десятков метров, представляющих интерес для ряда задач перспективных АОЛС, имеется большое количество окон, в которых отношение сигнала к шуму (SNR) может достигать $\geq 50 \text{ дБ}$ [63]. Это означает, что при умеренной влажности на относительно небольших (50—100 м) расстояниях атмосферу в этих окнах можно считать достаточно прозрачной. Данные рис. 3 указывают на существование в атмосфере по крайней мере пяти различных окон пропускания в ТГц диапазоне 1.4—4 ТГц. Для ТГц ККЛ хорошо подходят окна в областях 2.11, 2.52 и 3.42 ТГц.

Технология АОЛС накладывает дополнительные ограничения на выбор длины волны и плотности мощности воздействующего на мишень лазерного излучения: оно должно быть безопасным для глаз и кожного покрова.

Общие вопросы, связанные с рассеянием света. Эмпирическая модель Крузе. Следует различать три основных типа рассеяния: рэлеевское, Ми и неселективное. Тип рассеяния зависит от соотношения между размером рассеивающих частиц и длиной волны распространяемого света. Так, рэлеевское (молекулярное) рассеяние обусловлено наличием частиц размером, значительно меньшим длины волны света. При этом интенсивность рассеяния уменьшается с длиной волны как $\sim \lambda^{-4}$. Если размер частиц сравним с длиной волны излучения или равен ей, то наблюдается рассеяние Ми. При размерах частиц, превышающих длину волны излучения, имеет место неселективное рассеяние.

Интерес к спектральным диапазонам MWIR и LWIR связан с ожидаемым уменьшением рассеяния света и более высокой производительностью АОЛС в неблагоприятных погодных условиях, особенно в тумане. В последних публикациях, в которых сравниваются источники излучения в этих диапазонах с источниками в NIR и SWIR диапазонах, представлены многообещающие результаты при использовании ИК ККЛ [64].

Рэлеевское рассеяние существенно в УФ и видимом диапазонах, при этом оно незначительно в ИК диапазоне. Ослабление мощности лазера в тумане обусловлено главным образом поглощением и сильным Ми-рассеянием света взвешенными частицами воды, через которые должен распространяться луч. В то же время наличие окон прозрачности в атмосфере для длин волн в диапазонах SWIR

и MWIR (LWIR) обеспечивает практически одинаковое поглощение излучения в этих областях (рис. 2). Поэтому с точки зрения потерь на поглощение преимуществ среди длин волн 1.5—1.8, 3.3—4.2 и 4.5—5.1 мкм не существует [65]. Однако в контексте рассеяния большая длина волны света, как известно, приводит к меньшим потерям в результате уменьшения отношения размера неоднородности (капли) к длине волны в дымке (задымлении) и туманах [66].

Эмпирическая модель Крузе [67] может использоваться для характеристики реакции (отклика) АОЛС. Модель прогнозирует передаваемое излучение в соответствии с выражением:

$$\tau_{si} = \exp - \left\{ - \frac{3.91}{V} \left[\frac{\lambda_i}{0.55} \right]^{-q} x \right\}, \quad (1)$$

где τ_{si} — передаваемое излучение (относительное пропускание); x — расстояние распространения сигнала; λ_i — длина волны лазера; V — метеорологическая оптическая дальность (meteorological optical range, MOR), км. Показатель q определен Крузе и основан на размере и распределении рассеивающих частиц, он является линейной функцией V при $V < 6$ км и представляет собой постоянную величину в остальных случаях. С помощью этой модели можно оценить, насколько дальность передачи в тумане в SWIR диапазоне превышает ее значение в NIR. Модель имеет хорошее согласие с экспериментом во многих случаях в широком диапазоне длин волн. Однако из-за простоты модели при рассмотрении рассеяния в атмосфере могут быть случаи, когда она отклоняется от результатов наблюдения [68].

Известно, что туман имеет бимодальное распределение размера капель — большинство (>70 %) частиц размером 0.8—4.0 мкм, остальные 5—10 мкм [66]. Излучение в диапазоне MWIR (LWIR) при распространении в дымке или тумане обладает меньшими потерями вследствие резонансного рассеяния Ми, чем в случае NIR (SWIR), так как его длина волны в 6—8 раз больше. Кроме того, при появлении тумана из дымки мелкие частицы доминируют по количеству, что способствует более длительному времени безотказной работы MWIR (LWIR) АОЛС в начале неблагоприятных событий [68]. Частицы тумана находятся в воздухе дольше, чем капли дождя. Кроме того, они характеризуются размером, меньшим длины волны излучения ИК ККЛ. Таким образом, рассеяние излучения ИК ККЛ из-за осадков (неселективное рассеяние) менее эффективно, чем рассеяние в тумане (рассеяние Ми).

Атмосферная турбулентность. На распространение лазерного луча сильно влияет турбулентность атмосферы, т. е. случайные пространственно-временные изменения показателя преломления, вызванные перемещением воздуха, флуктуациями его температуры и плотности (рис. 4). Поэтому световые волны, распространяющиеся в атмосфере, испытывают не только поглощение и рассеяние, но и флуктуации передаваемой мощности [69—71].



Рис. 4. Снимок луча ИК ККЛ, прошедшего через фазовую пластину, имитирующую атмосферную турбулентность [70]

Основными эффектами, обусловленными турбулентностью атмосферы, которые существенно ограничивают возможности канала линии связи, являются сцинтилляции, блуждание и расширение лазерного луча. Сцинтилляция наиболее важна для звеньев АОЛС, вызывает колебания интенсивности на поверхности приемника. В то же время блуждание пучка определяет требования к приборам слежения и наведения системы АОЛС [72]. Этот эффект наблюдается в виде случайного движения сфокусированного пучка по поверхности фотоприемника. Блуждание пучка также выражается в терминах локальных флуктуаций интенсивности излучения. Это приводит к увеличению частоты системных битовых ошибок (BER) и, соответственно, ошибки отслеживания. Наконец, расширение светового луча до размеров, превышающих апертуру приемника, также приводит к ограничению практической эффективности АОЛС (геометрические потери).

Для смягчения таких атмосферных эффектов, как сцинтилляция или блуждание луча, применяют традиционные методы — адаптивную оптику, методы разнесения, усреднение апертуры и антенны быстрого слежения [73—75]. Разработаны также многочисленные методы точного слежения и автоматического сбора информации, которые используют квадрантные детекторы, сервомоторы, речевые катушки, шаговые двигатели, зеркала, ПЗС-матрицы и МЭМС [76].

Выбор длины волны источника излучения для АОЛС. *Краткие сведения об источниках излучения и фотоприемниках, используемых в коммерческих АОЛС.* Выбор длины волны для канала передачи данных АОЛС очень важен. В настоящее время коммерческие системы АОЛС обычно работают в областях 780—850 и 1520—1600 нм. При определении диапазона длин волн следует учитывать наличие основных компонентов АОЛС, обусловленных областью прозрачности атмосферы, безопасностью для глаз, скоростью модуляции, режимом работы, материальными затратами и т. д. Безопасность для глаз — одно из важнейших ограничений уровня оптической мощности, излучаемого передатчиком АОЛС. Лазеры, излучающие на $\lambda = 1550$ или ~ 10000 нм, более безопасны, чем лазеры с $\lambda = 850$ и 780 нм.

Лазерные диоды, называемые вертикально излучающими лазерами, или поверхностно-излучающими лазерами с вертикальным резонатором (vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL), являются высокоскоростными источниками излучения, которые идеально подходят для высокоскоростной передачи данных (Gbps) [77]. На сегодняшний день VCSEL, обеспечивающие скорость передачи данных 10 Гб/с, производятся всего несколькими ведущими компаниями. Эти лазеры стабильны, характеризуются очень низкими пороговыми токами, нестрогими требованиями к модулирующему сигналу и хорошим качеством луча. Наиболее распространенные VCSEL состоят из чередующихся слоев полупроводниковых материалов различного состава (например, твердых растворов AlGaAs с разным содержанием Al), выращенных на подложке GaAs, для излучения в диапазоне 750—980 нм.

Международная электротехническая комиссия классифицирует лазеры на четыре класса безопасности в зависимости от их мощности луча, длины волны и возможных опасностей [35]. Большинство систем АОЛС используют лазеры класса 1 и класса 1M. Например, система АОЛС, работающая на $\lambda = 1500$ нм, может передавать световой луч с 50-кратной более высокой мощностью по сравнению с системой, работающей в более коротком (NIR) диапазоне длин волн. Она позволяет распространять излучение на большие расстояния в случае ухудшения погоды и поддерживать более высокие скорости передачи данных.

В NIR диапазоне (780—850 нм) надежные, недорогие, высокопроизводительные оптоэлектронные устройства, т. е. лазеры и детекторы, легко доступны и широко используются в передающем оборудовании АОЛС. Для работы на этих длинах волн применяются усовершенствованные лазеры VCSEL и кремниевые фотодиоды. Кремниевые детекторы обычно имеют максимум спектральной чувствительности ~ 850 нм, что делает их совместно с VCSEL очень эффективными инструментами. Кремниевые детекторы идеально подходят для систем АОЛС, работающих с очень высокой пропускной способностью (10 Гбит/с).

SWIR диапазон (1520—1600 нм) также хорошо применим для каналов АОЛС. Высококачественные лазеры и детекторы для этого спектрального диапазона легко доступны. Эти длины волн также используются в волоконной технологии. Источниками излучения служат лазеры с плоским резонатором (Фабри–Перо) и лазеры с распределенной обратной связью (РОС; distributed feedback), изготовленные на основе полупроводниковой технологии с гетеропарой InGaAs/InP. Для построения приемника излучения обычно применяются детекторы с чувствительным элементом из InGaAs. Эти детекторы основаны на технологии PIN или APD (avalanche photodiode) и оптимизированы для работы на $\lambda = 1310$ или 1550 нм, обеспечивая скорость передачи данных 10 Гбит/с.

Системы LWIR АОЛС более сложные из-за технологических аспектов (структуры полупроводниковых сверхрешеток). Однако в этом спектральном диапазоне, как показано выше, меньше влияние поглощения и рассеяния на распространение луча через умеренный туман по сравнению с другими ИК диапазонами. Атмосферная турбулентность также характеризуется меньшим влиянием на распространение LWIR. Отмечается существенно меньшее влияние солнечного излучения (29 дБ) на $\lambda = 10$ мкм по сравнению с $\lambda = 1550$ нм [36, 37].

Относительно недавно разработанные коммерческие ККЛ являются привлекательными источниками излучения, работающими в данном спектральном диапазоне. Они представляют собой компактные полупроводниковые лазеры высокой (>4 Вт) мощности с полосой пропускания до 100 ГГц. Это

делает ККЛ важными инструментами для построения систем связи. В приемном модуле АОЛС на базе ККЛ применяется детектор МСТ (КРТ), характеризующийся сверхвысокой обнаружительной способностью и полосой пропускания сигнала ~ 1 ГГц.

В длинноволновой области применяют ИК фотодетекторы на квантовых ямах (QWIP, Quantum Wells Infrared Photodetector). Однако они не могут конкурировать с фотодиодом HgCdTe, особенно при более высоких (>70 К) температурах из-за фундаментальных ограничений, связанных с межзонными переходами.

Экспериментальное обоснование выбора длины волны источника излучения для АОЛС. Можно выделить три разные длины волн оптического излучения, используемые в коммерческих системах АОЛС, приходящиеся на окна прозрачности атмосферы в NIR (780—850 нм) и SWIR (1520—1600 нм) областях. В их конструкции использованы различные источники излучения и детекторы. Эти оптоэлектронные элементы характеризуются параметрами, зависящими от длины волны и скорости передачи данных. Приведем экспериментальные примеры того, насколько большое влияние оказывает выбор длины волны излучения на характеристики АОЛС.

На рис. 5 показаны зависимости полного затухания от метеорологической оптической дальности (при ее низких значениях) и от расстояния связи на $\lambda = 780, 850$ и 1550 нм. Указанные длины волн соответствуют рабочим спектральным диапазонам коммерчески доступных систем АОЛС. Видно, что из коммерчески доступных АОЛС в неблагоприятных погодных условиях (туман) следует использовать лазеры, работающие на $\lambda = 1550$ нм (SWIR), так как они характеризуются наименьшим затуханием сигнала по сравнению с более короткими длинами волн.

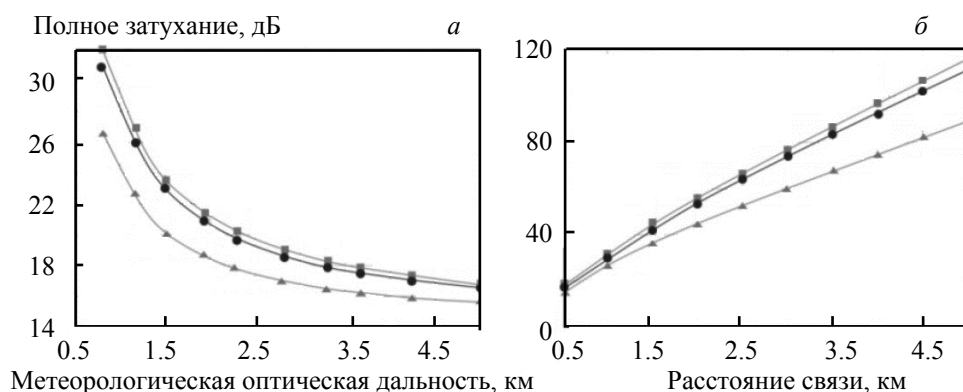


Рис. 5. Зависимости полного ослабления излучения от метеорологической оптической дальности (а) и затухания от расстояния связи для $\lambda = 780$ (■), 850 (●) и 1550 нм (▲) (б) [4]

Проведенный в [4] анализ показывает, что атмосферное затухание зависит также от скорости выпадения осадков (рис. 6). Однако дождь оказывает не настолько сильное спектральное влияние, поскольку капли имеют больший размер по сравнению с длинами волн лазеров и вызывают минимальное рассеяние светового пучка.

В настоящее время наблюдается заметное развитие АОЛС на базе ККЛ, работающих в окнах прозрачности атмосферы в диапазонах MWIR и LWIR. Пока работы в основном выполняются на лабораторно-экспериментальном уровне. Сравнение ослабления излучения LWIR (10 мкм) с его значением, полученным для других длин волн при различных видимостях (рис. 7), показывает, что диапазон LWIR характеризуется лучшей передачей в широком диапазоне видимости [78].

В ограниченном количестве работ описываются результаты сравнительной экспериментальной проверки пропускания лазерного пучка на длинах волн излучения из NIR, SWIR и MWIR (LWIR) диапазонов спектра. На рис. 8 показаны результаты измерения потерь на пропускание в зависимости от времени суток для четырех различных длин волн [79]. В дневное время значительно снижается пропускание на трех длинах волн <8 мкм. В то же время зарегистрировано увеличение концентрации водяного пара. Аналогичные эксперименты проводились для различных концентраций паров масла. В этом случае излучение LWIR также характеризуется наименьшим затуханием (рис. 8, б). Приве-

денные экспериментальные данные полностью соответствуют изложенным выше представлениям и подтверждают преимущество ККЛ перед традиционными источниками лазерного излучениями с длинами волн в областях NIR и SWIR.

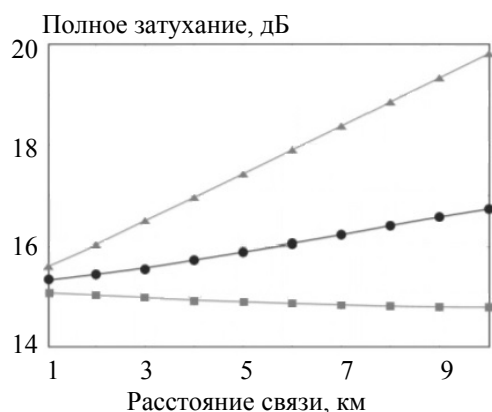


Рис. 6. Зависимость полного затухания от расстояния связи при разных интенсивностях осадков в виде дождя [4]: легкий (■), умеренный (●), ливень (▲)

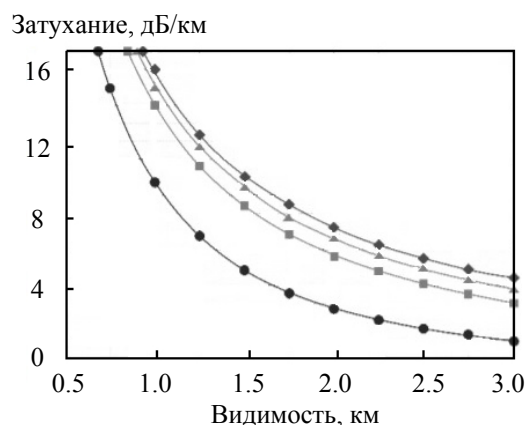


Рис. 7. Зависимость ослабления излучения от метеорологической оптической дальности для $\lambda = 1550$ (■), 10 (●), 0.850 (◆) и 1.064 мкм (▲) [78]

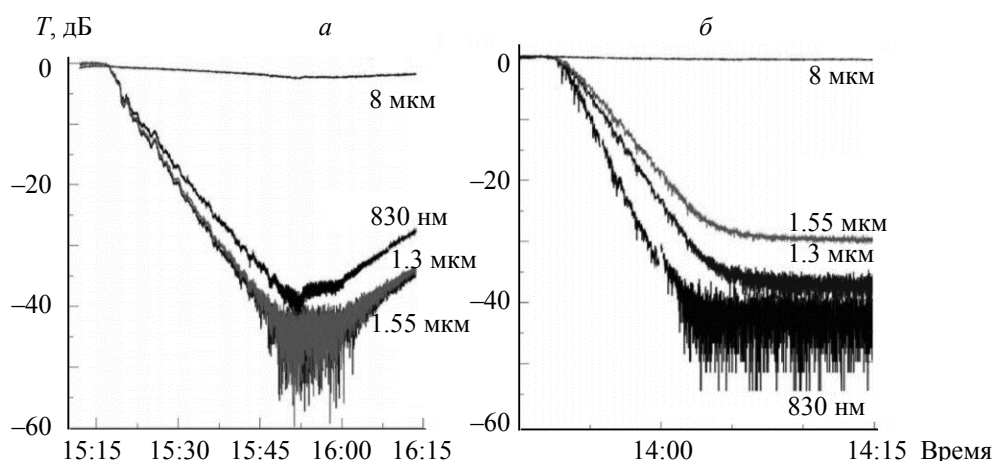


Рис. 8. Зависимости потерь пропускания для различных длин волн АОЛС от времени увеличения концентрации водяного пара (а) и масляного пара (б) [79]

Резкое снижение качества сигнала для NIR каналов связи с возрастанием плотности рассеиваемых частиц отчетливо проявляется в глазковых диаграммах, приведенных на рис. 9. В верхней части рис. 9 показаны примеры глазковых диаграмм, полученные для линии связи 1.3 мкм в условиях низкой (0.57 мг/см^3) и высокой (11 мг/см^3) концентрации частиц масла.

Как видно, при низкой концентрации частиц “открытый глаз” полностью закрылся (зашумление глазковой диаграммы) при их высокой концентрации, а сигнал сильно деградировал от 1.5 В до 200 мВ. С другой стороны, повышение концентрации частиц масла практически не повлияло на передачу данных в MIR-канале, и для тестируемых сред усиление сигнала не требовалось. Для сравнения со SWIR-каналом в нижней части рис. 9 приведены глазковые диаграммы для АОЛС с длиной волны 8 мкм, на которых практически отсутствует деградация, а частота битовых ошибок при самой высокой концентрации паров масла не превышала 10^{-13} .

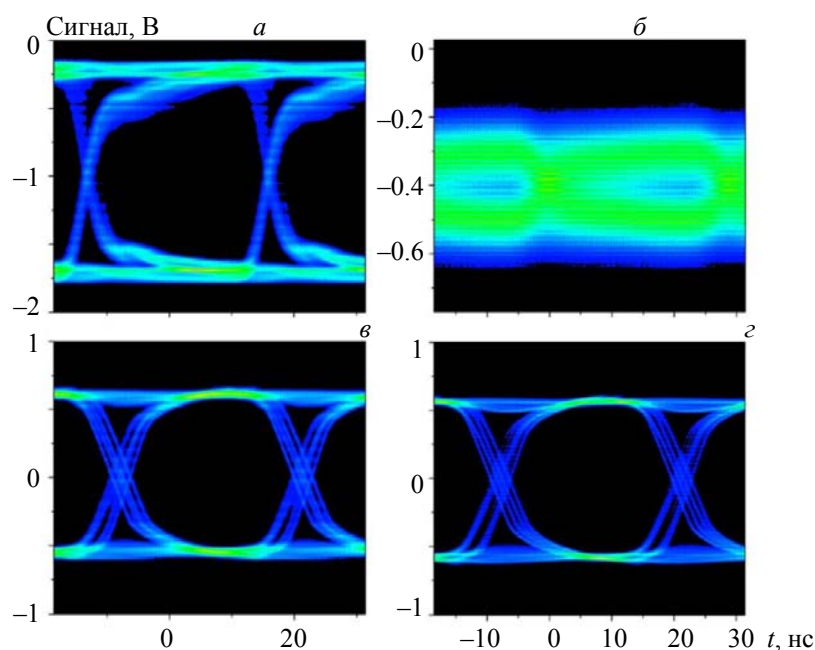


Рис. 9. Глазковые диаграммы для лазерного канала 1.33 мкм, работающего со скоростью передачи данных 34 Мбит/с (DS-3) (*a*, *б*) в условиях низкой концентрации (0.67 мг/см^3) (*a*) и высокой концентрации (1.33 мг/см^3) (*б*); для ККЛ канала (8 мкм), работающего с такой же скоростью передачи данных (*в*, *з*) в условиях низкой концентрации (*в*) и высокой концентрации (*з*) [79]

Примеры практической реализации АОЛС на базе ККЛ. АОЛС на базе ИК ККЛ. Уникальная особенность ККЛ — сверхбыстрая релаксация в них носителей заряда, которая обусловлена рассеянием электронов на оптических фонах (происходит в пикосекундном диапазоне). В обычных полупроводниковых лазерах, основанных на межзонных переходах, время жизни носителей заряда составляет порядка нескольких наносекунд; еще более медленное время релаксации имеет место в большинстве других лазерных систем. Это свойство делает ККЛ идеально подходящим для высокоскоростной работы [80].

Переходная реакция любого лазера на изменение условий его накачки (например, ток возбуждения в полупроводниковом лазере) определяется взаимодействием между динамикой инверсии населенности и динамикой лазерного поля [81]. Так, в традиционных биполярных лазерных диодах обе величины реагируют на такое изменение, претерпевая связанные затухающие колебания в направлении их стационарных значений, причем механизм затухания обеспечивается стимулированным излучением и насыщением усиления. Эти так называемые релаксационные колебания вызывают резонансное усиление отклика лазерной модуляции на их характерной частоте. При этом модуляционная характеристика становится более слабой по мере увеличения задающей частоты.

В ККЛ ситуация радикально иная, так как в этих устройствах релаксация плотности носителей заряда к равновесному состоянию происходит преимущественно за счет рассеяния на фонах. Поскольку это сверхбыстрый механизм, переходные колебания инверсии населенности, а следовательно, и плотность фотонов, затухают и в частотной характеристике не возникает резонанса. Динамика модуляции ККЛ в значительной степени просто ограничена пикосекундным временем жизни носителей тока в них, поэтому могут быть получены собственные полосы пропускания $>100 \text{ ГГц}$ [82, 83].

Первые исследования, посвященные применению ИК ККЛ в АОЛС, появились в начале 2000-х гг. Представлены несколько лабораторных систем АОЛС, использующих лазеры высокой мощности с охлаждением жидким азотом. Например, в [5] описано устройство, в котором использован ИК ККЛ на основе гетеропары AlInAs/GaInAs с $\lambda = 8.1 \text{ мкм}$; расстоянием, на которое передавался сигнал, 1 м; скоростью передачи данных 2.5 Гбит/с при детектировании сигнала с помощью QWIP. Выходные характеристики излучения показывают почти линейный наклон 0.51 Вт/А между управляющим током 150 мА, соответствующим порогу лазера, и его рабочим значением 300 мА, пригодным для высо-

кочастотной модуляции и цифровой передачи данных. Используемый лазер обеспечивает модуляцию излучения с частотой 7 ГГц, что соответствует стандартному широкополосному соединению. Однако модуляционный отклик ограничен паразитной емкостью поперек слоев структуры и дифференциальным сопротивлением лазера, что является основной причиной снижения скорости передачи. Для оптимального набора параметров системы измеренная в работе частота битовых ошибок BER $<10^{-12}$.

В [5] описана модифицированная установка, оптическая схема которой приведена на рис. 10. Проведены испытания АОЛС с ИК ККЛ на открытом воздухе. Расстояние передачи данных 100 м. В приемном блоке использованы оптический телескоп и быстродействующий КРТ-детектор (МСТ) с криогенным охлаждением. Излучение ККЛ коллимировано с помощью ZnSe-оптики. Апертура приемного телескопа 76 мм. Управление работой лазера осуществлялось с помощью сигнала, ширина полосы частот которого находилась в диапазоне 0.75—1.45 ГГц. При токе смещения 100 мА и температуре 20 К канал передачи данных работал в течение 5 ч при импульсной мощности ККЛ 7.5 мВт. Использование для передачи данных квадратурной фазовой манипуляции (quadrature phase shift keying) позволило передавать почти 800 телевизионных каналов и 100 радиоканалов.

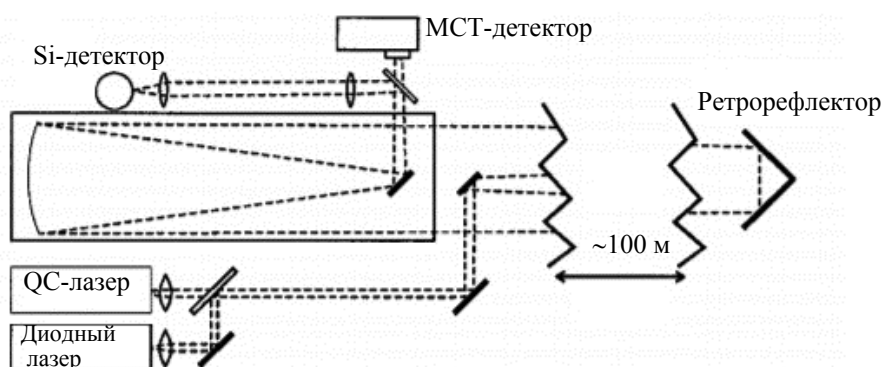


Рис. 10. Оптическая схема открытой линии связи на базе ИК ККЛ (приемник и передатчик установлены на двух зданиях Bell Laboratories, расстояние между которыми ~ 100 м) [5]

Типичный пример передаваемого потока данных показан на рис. 11, где представлены исходный сигнал, полученный от приемного устройства, объединяющего в себе малошумящий усилитель принимаемого со спутника сигнала и понижающий преобразователь частоты (low noise block down converter, спутниковый конвертер), и типичный сигнал, полученный после прохождения лазерной линии связи на базе ИК ККЛ. Из-за ограниченной полосы пропускания используемого детектора каналы на более высоких частотах характеризуются затуханием 10 дБ по сравнению с исходным сигналом. Эти потери приводят к неполной передаче данных, что вызывает уменьшение количества фактически декодированных каналов до ~ 650 .

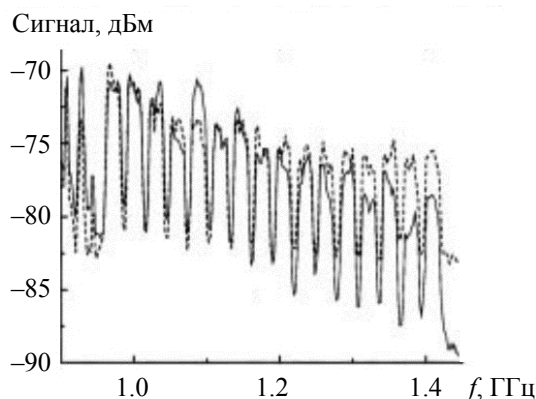


Рис. 11. Сигнал на выходе LNB (штриховая линия) и сигнал после передачи по каналу свободного пространства (сплошная линия) [5]

В работе [5] авторы сравнили влияние длины волны лазерного излучения на качество и стабильность связи. Для этого в схему включен второй лазер, представляющий собой лазерный диод с $\lambda = 0.85$ мкм и выходной мощностью 10 мВт. Для регистрации его излучения использован кремниевый фотоприемник.

При типичных погодных условиях, включая солнечный свет, сильный дождь, а также грозу, различия в чувствительности не наблюдались. Однако во время плотного тумана, при почти нулевой видимости имело место существенное различие временных зависимостей интенсивностей сигнала для линий связи, работающих в LWIR ($\lambda = 8.1$ мкм) и NIR диапазонах (рис. 12). Более высокая производительность ИК ККЛ канала по сравнению с NIR-связью видна из зависимости интенсивности рассеяния Рэлея и Ми от длины волны. Конкретная форма кривой на рис. 12 (вставка) свидетельствует о предполагаемом изменении размера и распределения капель воды при изменении плотности и структуры тумана со временем. Как видно, изменения погодных условий влияют на качество линии связи в LWIR гораздо меньше, чем в NIR диапазоне [5].

В более поздних работах исследовались системы АОЛС на базе ИК ККЛ, работающих без криогенного охлаждения при комнатной температуре, что стало возможным благодаря прогрессу в технологии изготовления ККЛ. В этом случае ККЛ охлаждались с помощью термоэлектрического эффекта, например с помощью элементов Пельтье.

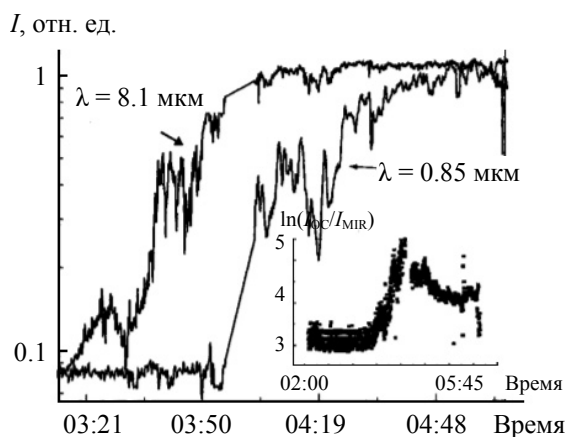


Рис. 12. Сравнение временных зависимостей интенсивностей сигнала для линий связи, работающих в LWIR ($\lambda = 8.1$ мкм) и NIR диапазонах ($\lambda = 0.85$ мкм); на вставке — временная зависимость разности оптических потерь на этих длинах волн при изменении структуры тумана в логарифмическом масштабе [5]

В работе [68] представлены результаты измерений на коаксиальном, многоволновом испытательном стенде, где в течение 6 ч одновременно сравнивались системы АОЛС (SWIR и LWIR) на расстоянии 550 м. Неблагоприятные погодные условия, связанные с дымкой, туманом и дождем, при которых проводился эксперимент, привели к снижению фактической видимости с 12 до ~1 км. Экспериментальная схема измерений представлена на рис. 13.

Для обеспечения эквивалентных условий распространения излучения на $\lambda = 1.345$, 1.558 и 8.1 мкм в атмосфере создан коаксиальный канал измерений путем объединения SWIR лазеров в оптоволоконном узле, а также с помощью юстировки в свободном пространстве излучения LWIR с использованием германиевого окна. В процессе измерений контролировались одинаковые для всех лучей поперечное сечение и угловая расходимость излучения. Для того чтобы избежать любого дрейфа в ходе измерений, мощность излучения поддерживали постоянной. На расстоянии 10 м от приемного и передающего устройств в режиме реального времени контролировались наружная влажность, температура, давление, сила и направление ветра.

Амплитудная модуляция SWIR лазеров осуществлялась независимо, средняя мощность излучения 20 мВт. Источник излучения LWIR — охлаждаемый с помощью элемента Пельтье ККЛ с РОС, работающий на $\lambda = 8.1$ мкм в импульсном режиме при средней выходной мощности 1 мВт. Излучение ИК ККЛ электрически модулировалось по амплитуде и механически прерывалось, что позволило применить синхронное детектирование.

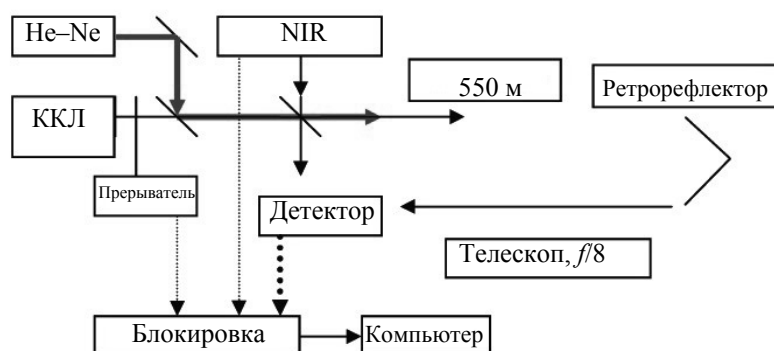


Рис. 13. Экспериментальная схема измерений: LWIR, NIR и He–Ne-каналы излучения коаксиально связаны, сигналы измеряются на расстоянии 550 м от передатчика [68]

Лучи распространялись соосно от плоского золотого зеркала, расположенного перед собирающим обратный сигнал ньютоновским телескопом ($f/8$), по направлению к полюсу с золотым покрытием ретрорефлектору, расположенному на расстоянии 275 м от телескопа. Излучение SWIR и LWIR диапазонов фильтровалось с помощью установленного второго германиевого окна. В качестве NIR детектора использован фотоприемник PDA400 фирмы ThorLabs, LWIR излучение зарегистрировано с помощью охлаждаемого в жидком азоте КРТ-детектора (МСТ) с граничной частотой модуляции 2 МГц.

Результаты измерений, полученные в [68], представлены на рис. 14. Поведение кривой затухания для $\lambda = 8.1$ мкм объяснено с помощью механизма “очистки” атмосферы. Крупные частицы (5–10 мкм), чувствительные к LWIR излучению, собираются каплями падающего дождя, образуют ядро, а затем падают на землю, “расталкивая” со своего пути более мелкие взвешенные SWIR-селективные частицы [84]. Таким образом, более мелкие частицы остаются, а крупные отфильтровываются. В результате проведенных исследований авторы приходят к выводу, что в LWIR диапазоне передается в два раза больше мощности излучения по сравнению с $\lambda = 1.558$ мкм и в три раза больше, чем на $\lambda = 1.345$ мкм. Полученные результаты подтверждаются с помощью упомянутой выше эмпирической модели Крузе, из которой также следует, что пропускная способность АОЛС должна быть больше в LWIR области по сравнению с SWIR [67]. Однако в условиях плохой видимости в начале тумана ($V = 1.05$ км) регистрируемый LWIR-сигнал может отличаться от предсказаний модели и быть более чем на 10 дБ/км сильнее, чем на традиционных длинах волн SWIR. Авторы связывают это с кратковременным дождем, который повлиял на бимодальное распределение частиц за счет механизма “очистки”.

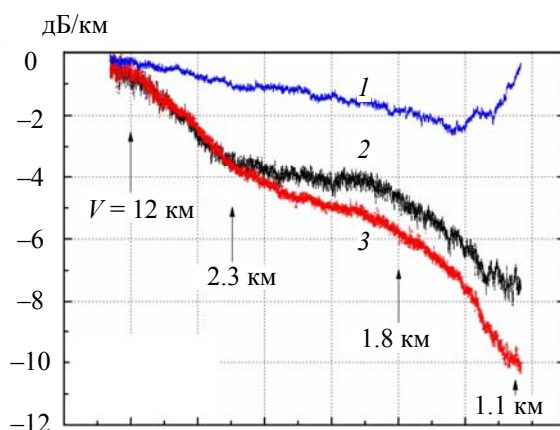


Рис. 14. Зависимость затухания на $\lambda = 8.1$ (1), 1.558 (2) и 1.345 мкм (3); более сильное затухание наблюдается на более коротких длинах волн [68]

Сравнительный анализ MWIR (LWIR) на базе ККЛ и SWIR АОЛС проведен в [4, 6, 85—87]. Например, в [87] для этих систем подробно проанализировано влияние атмосферной турбулентности на качество передачи данных. Анализ проведен путем сопоставления коэффициентов ошибок в словах и битах (word error rates (WER) и bit error rates (BER)) с использованием оптимизированного кода Грэя. Атмосферная турбулентность моделирована в лабораторных условиях с помощью вращающихся фазовых пластинок [88]. В процессе испытаний применялась фазово-импульсная модуляция (pulse position modulation, PPM). Подчеркнем, что авторы сравнивают рабочие характеристики SWIR и MWIR АОЛС с учетом их весогабаритных и мощностных параметров, что предполагает использование неохлаждаемых источников и приемников лазерного излучения, а также отсутствие элементов коррекции волнового фронта (SWaP-C; Size, Weight, Power, and Cost). Другими словами, исследуется концепция создания доступных (бюджетных) АОЛС для коммерческих и военных применений (концепция низкой стоимости).

Блок-схема SWaP-C измерительной установки показана на рис. 15. Оба сигнала (MWIR и SWIR) формировались генератором сигналов произвольной формы, работающим с частотой дискретизации 100 МГц с четырьмя выборками на слот (частота слотов ограничена полосой пропускания драйвера импульсов ККЛ). Генерируемые ККЛ и стандартными телекоммуникационными SWIR-излучателями сигналы возмущались одной и той же вращающейся фазовой пластинкой и собирались на приемных площадках соответствующих фотоприемников, откуда поступали на осциллограф с синхронизированной выборкой и сохранялись для последующей обработки.

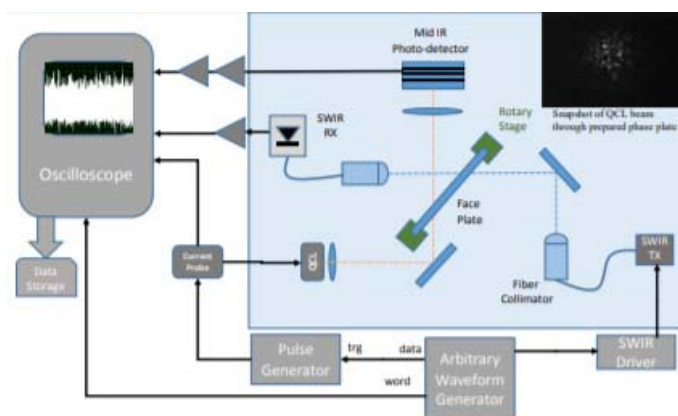


Рис. 15. Блок-схема SWaP-C АОЛС установки [87]

На рис. 16 показаны результаты измерений для каналов MWIR и SWIR. Как видно, открытая оптическая линия связи в MWIR диапазоне демонстрирует значительно меньшую зависимость от турбулентности. В то же время имеются четкие свидетельства ухудшения WER с ростом турбулентности для SWIR АОЛС. Такой же вывод следует из рис. 16, б, где выборки данных при различных SNR подвергались изменению скорости вращения фазовых пластинок. Результаты теста для SWIR излучения показывают явное ухудшение WER при увеличении скорости турбулентности.

Фазовое дрожание цифрового сигнала данных (джиттер) представляет собой нежелательные фазовые или частотные отклонения передаваемого сигнала. Они возникают вследствие нестабильности задающего генератора, изменений параметров линии передачи во времени и различной скорости распространения частотных составляющих одного и того же сигнала. Джиттер — один из ключевых параметров, влияющих на работоспособность каналов связи с фазово-импульсной модуляцией, так как приводит к искажению передаваемой информации.

Ранее [89] было показано, что использование кодирования Грэя минимизирует восприимчивость звеньев фазово-импульсной модуляции к слабому джиттеру. Авторы демонстрируют, что двоичное декодирование информации работает так же хорошо, как декодирование Грэя, поэтому модуляция ККЛ не приводит к достаточно сильному джиттеру, чтобы повлиять на характеристики BER (рис. 17). Сделан вывод, что в условиях атмосферной турбулентности нет необходимости использовать кодирование Грэя для каналов MWIR, работающих на десятках Мбит/с, поэтому предложенная концепция еще больше упрощает реализацию бюджетного варианта MWIR АОЛС. Таким образом, исследована и протестирована бюджетная MWIR АОЛС на базе ККЛ, которая сопоставлена с SWIR АОЛС. Как и

предполагалось, MWIR АОЛС продемонстрировала превосходную устойчивость к моделируемой атмосферной турбулентности. Тестовые данные проанализированы с помощью кода Грэя, который показал незначительное влияние на BER характеристики АОЛС.

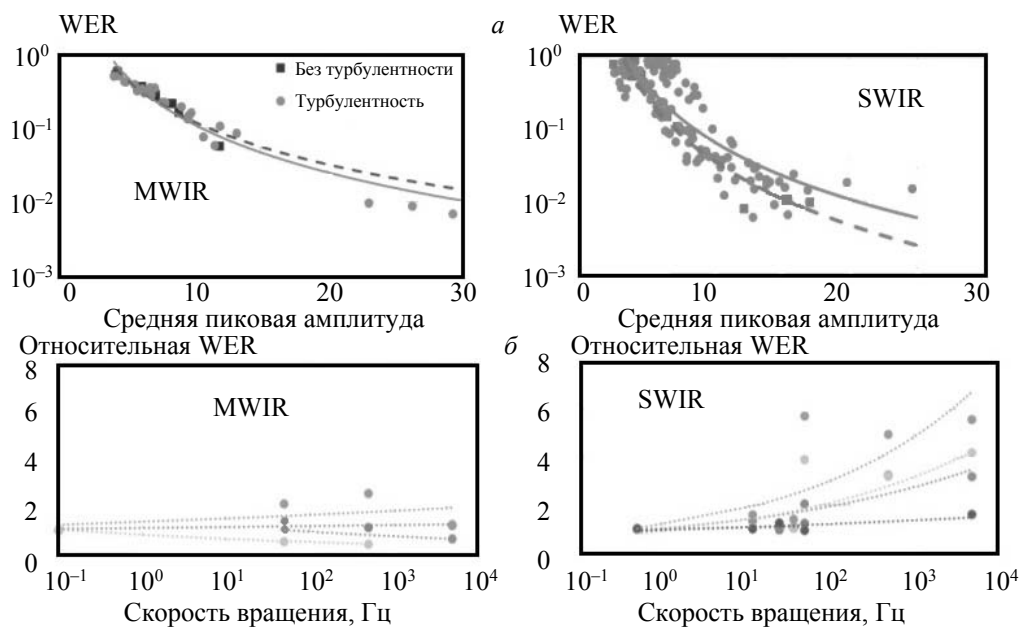


Рис. 16. Зависимости частоты ошибок в словах (WER) для MWIR и SWIR АОЛС от средней пиковой мощности в присутствии фазовой пластины и без нее (а); влияние скорости вращения фазовой пластинки на WER при разных SNR [87] (б)

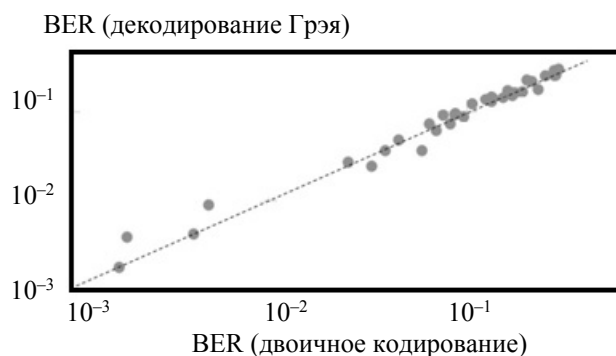


Рис. 17. Зависимость MWIR BER при декодировании Грэя от мягкого (двоичного) декодирования [87]

Особого внимания заслуживают результаты исследований [6]. В работе описан полноценный экспериментальный образец АОЛС, в состав передающего модуля которого входят оптика, лазерная головка, блок питания и управления, блок охлаждения и система управления положением луча (расходимость 2.5 мрад). В приемном модуле используются Ge-объектив, КРТ-детектор (обнаружительная способность $3.8 \cdot 10^9$ см·(Гц/Вт)), схема обработки сигнала, электронный компаратор и интерфейсный блок. Параметры АОЛС изучены с использованием псевдослучайного генератора импульсов.

На рис. 18 показаны примеры импульсов, зарегистрированных для форматов кодирования без возвращения к нулю (NRZ) и с возвращением к нулю (RZ). Заметны искажения формы импульса для сигналов NRZ-кодирования. Эти эффекты могут быть следствием ранее описанных факторов, влияющих на работу лазера и связанных с паразитными электрическими элементами конструкции ККЛ.

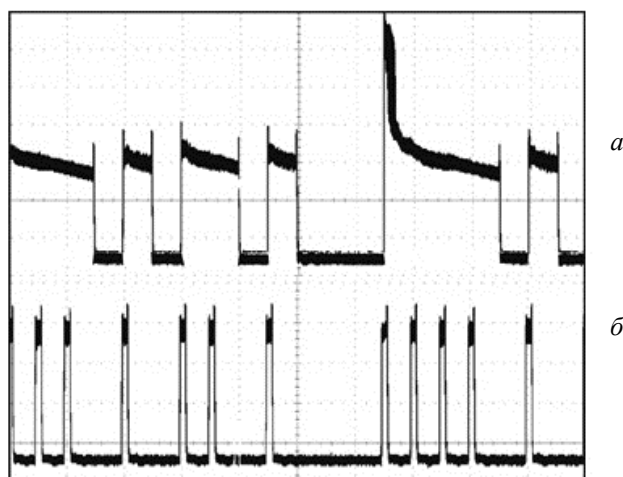


Рис. 18. Лазерные импульсы для разных форматов импульсного кодирования:
a — без возвращения к нулю; *б* — с возвращением к нулю [6]

Для передачи данных применен специальный сетевой мост, который работает с буферизацией данных. Данные принимаются в кадрах через Ethernet, анализируются их содержание и правильность. С использованием такого оборудования получена скорость передачи данных 2 Мбит/с при дальности 2.5 км (для BER = 10^{-9}).

Как свидетельствуют приведенные результаты, достигнутые скорости передачи данных с помощью АОЛС на базе ИК ККЛ ≤ 10 Гбит/с существенно ниже теоретических возможностей. На наш взгляд, причины заключаются в несовершенстве конструкции ККЛ (существенные паразитные потери), их недостаточной мощности, низком быстродействии фотоприемников в области LWIR (MWIR), а также необходимости выбора оптимального режима кодирования, обеспечивающего передачу данных с максимальной скоростью. В то же время это обычная ситуация при переходе на принципиально новую элементную базу. Результаты по оптическим элементам АОЛС (ККЛ и матричные ФПУ) свидетельствуют о значительном прогрессе параметров элементной базы АОЛС на базе ККЛ. На сегодняшний день средняя мощность коммерческих ИК ККЛ при комнатной температуре >4 Вт в непрерывном режиме на $\lambda = 4.6$ мкм (модель 1101-46-CW-2000 фирмы Pranalytica), а в диапазоне 8—12 мкм превышает 2 Вт (модель Aries-2™ фирмы Daylight Solution). В длинноволновом диапазоне наиболее предпочтителен по всем параметрам охлаждаемый ФПУ на основе тройного раствора CdHgTe [90].

Перспективы и возможные области применения АОЛС на базе ТГц ККЛ. Атмосферная турбулентность может ограничить доступность и надежность атмосферной оптической линии связи (АОЛС) и является одним из основных мешающих факторов для развертывания ИК связи. Характеристики АОЛС могут ухудшаться даже в ясную погоду в результате сцинтилляции и временного пространственного изменения интенсивности света. Другая важная проблема АОЛС на базе ИК ККЛ — необходимость разработки методов указания, обнаружения и отслеживания (pointing, acquisition, and tracking), которые необходимы для работы из-за распространения узкого лазерного луча через свободное пространство на большое расстояние. В результате оптические приемопередатчики должны быть направлены друг на друга для осуществления связи вдоль линии, в которой поддерживается точное выравнивание [91].

Диапазон ТГц частот — естественная альтернатива ИК связи при неблагоприятных погодных условиях, таких как туман, пыль и турбулентность. Как видно из рис. 18, ТГц излучение имеет меньшее ослабление (рассеяние) из-за тумана и дождя по сравнению с ИК излучением. В то же время влажный воздух сильно поглощает ТГц излучение в широкой области частот (за исключением узких окон вблизи 35, 96, 140, 220 ГГц и т. д.). Поэтому ТГц и миллиметровые волны эффективны при обнаружении присутствия воды, их применение делает возможным распознавание скрытых под одеждой объектов на человеческом теле, так как одежда для этих длин волн прозрачна, а содержание воды в организме человека $\sim 60\%$ [92].

ТГц системы АОЛС не подвержены воздействию (засветке) внешних источников оптических сигналов, поэтому из-за низкого уровня энергий фотонов на ТГц частотах общий шум определяется тепловым шумом приемника [93]. На рис. 19 видны четко определенные спектральные “окна”, например, в области 200—300 ГГц. Исходя из сильного ослабления атмосферы за счет поглощения водяными парами, в [94] сделан вывод, что практические расстояния ТГц линий связи ограничены несколькими десятками метров. Поэтому отмеченное выше преимущество, связанное с устойчивостью к турбулентности ТГц волн по сравнению с MWIR и LWIR, условное, так как проявляется только при работе в узких окнах прозрачности на относительно небольших расстояниях. Несмотря на преимущества, особенно при работе в условиях атмосферной турбулентности, беспроводные ТГц АОЛС-системы ограничены средними и короткими расстояниями, так как сценарии на открытом воздухе гораздо менее вероятны при неблагоприятных погодных условиях. Поскольку ТГц излучение характеризуется меньшими дифракционными эффектами по сравнению с излучением в микроволновой области, следует ожидать, что любая ТГц система потребует прямой видимости между передатчиком и приемником.

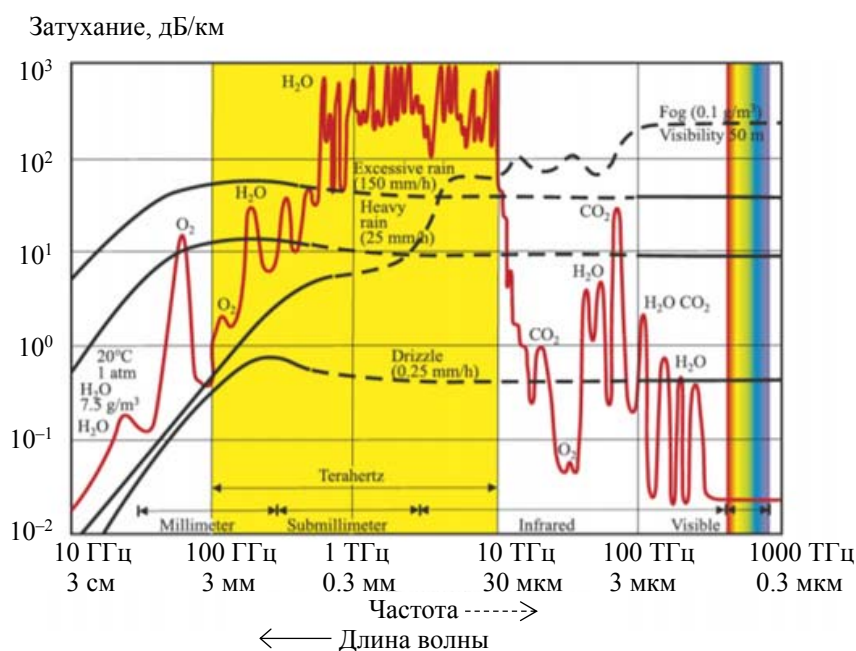


Рис. 19. Затухание излучения в земной атмосфере от видимой до радиочастотной области [91]

В настоящее время ТГц ККЛ являются единственными источниками, способными генерировать более 10 мВт когерентной средней мощности на частоте >1.5 ТГц. Для того чтобы охарактеризовать высокую способность скорости модуляции ТГц ККЛ и построить высокоскоростную линию ТГц связи, необходим также быстрый детектор.

Одна из первых АОЛС на базе ТГц ККЛ продемонстрирована в [95]. Исследована ТГц линия связи, работающая на частоте 3.8 ТГц с применением ККЛ и фотоприемника на квантовых ямах. Эта линия связи использована для передачи звука в помещении на расстояние 2 м. Интенсивность несущей частоты на фотоприемнике в 100 раз превышала измеренный уровень шума. Позднее в [96] увеличили частоту до 4.1 ТГц. Непосредственная модуляция излучения ТГц ККЛ позволила передать аналоговые сигналы на расстояние до 2 м при ширине полосы модуляции ~580 кГц, ограничиваемой схемой модуляции. При этом в качестве фотодетектора, как и в [95], использовано фотоприемное устройство на квантовых ямах.

ТГц ККЛ, работающие на частоте <1.5 ТГц при комнатной температуре, вероятно, не будут доступны в ближайшем будущем [97]. С учетом частотной зависимости пропускания атмосферы (рис. 20) не следует ожидать, что ТГц ККЛ будут играть значительную роль в беспроводных линиях ТГц связи на больших расстояниях (>1 км), поскольку ожидаемая частота для таких ТГц АОЛС ~300 ГГц.

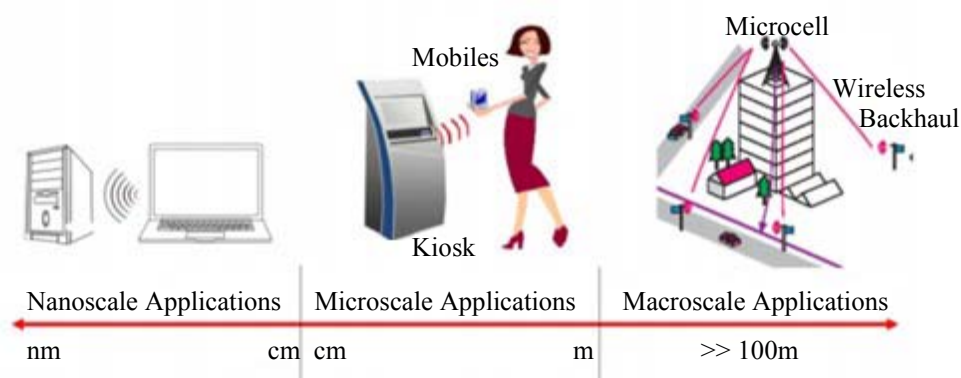


Рис. 20. Различные области применения АОЛС на ТГц частотах [98]

Возможные области применения АОЛС на базе ТГц ККЛ представлены на рис. 19 [98]. Учитывая особенности ТГц излучения и чрезвычайно высокие скорости передачи данных, выделим перспективные приложения для будущих АОЛС на базе ТГц ККЛ. Эти приложения можно разделить на основные области: беспроводная когнитивная обработка данных и удаленные вычисления [99—101], зондирование [102—106], визуализация [102, 107—109], беспроводная связь [110—115] и навигация по местоположению (ТГц навигация, также называемая локализацией или позиционированием) [116, 117]. Для их практической реализации предстоит большая работа, связанная с созданием компактных, эффективных, работающих при комнатной температуре мощных ТГц ККЛ, а также чувствительных приемных устройств.

Нетрадиционные методы устранения влияния турбулентности и повышения информационной емкости канала передачи. Атмосферная турбулентность играет большую роль в передаче пространственных мод в свободном пространстве. Эти эффекты атмосферы исследованы в недавних теоретических работах [118—123] и лабораторных симуляциях [124—130]. Хотя передача пространственных мод света на большие расстояния без искажений — очень сложная задача, в последнее время успешно проведено несколько экспериментальных исследований передачи пространственных мод на большие расстояния в свободном пространстве. Большинство из них используют так называемые “скрученные, закрученные” световые моды, когда фазовый фронт света имеет спиральную или скрученную фазовую структуру. Поскольку эти моды могут нести целое число квантов орбитального углового момента, их часто называют модами ОАМ.

Решение уравнений Максвелла в цилиндрических координатах приводит в квантовой теории к состояниям с определенной энергией $\hbar\omega$, продольным импульсом $\hbar k_z$ и определенной проекцией полного момента импульса на ось z (\hbar — постоянная Планка). Волновой фронт таких состояний представляет собой пространственную спираль (геликоид), а силовые линии вектора Пойнтинга образуют винтовую линию (рис. 21). От всех плоских волн такие состояния отличаются наличием ненулевой проекции ОАМ импульса на направление движения, а от сферических — наличием определенного направления движения. Для краткого обозначения этого состояния используют термин “закрученные” фотоны [131].

Широкий интерес к пучкам с ОАМ возник с появлением лазеров, особенно после опубликованной в 1992 г. статьи Аллена и др. [132]. Показано, что сфазированные по спирали световые лучи, содержащие азимутальную фазовую составляющую $\varphi = \exp(i l \theta)$, имеют орбитальный угловой момент $l\hbar$ на один фотон, где l — топологический заряд (равен числу поворотов фазы на 2π при обходе по замкнутому контуру, охватывающему ядро спиральной волны), θ — азимутальный угол, $\hbar = \hbar/2\pi$. Предложены способ получения пучков с высокими значениями ОАМ посредством трансформации лаггер-гауссовых лазерных мод (хорошо изученных параксиальных световых полей с радиально-симметричной формой интенсивности, инвариантной к распространению, и нашедших применение в оптических коммуникациях), схема измерения этого момента, а также обсуждены некоторые вопросы применения пучков с ОАМ. Выяснилось, что закрученные фотоны, обладающие дополнительной степенью свободы — проекцией полного момента импульса на направление своего движения, — новые полезные инструменты, которые могут найти широкое применение в разных областях физики, в частности, для передачи информации с помощью АОЛС.

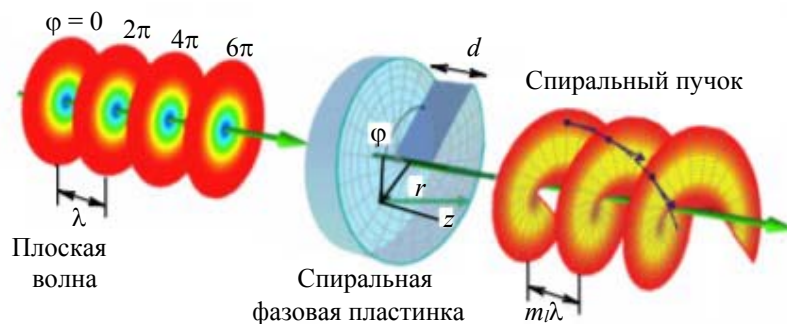


Рис. 21. Трансформация плоской волны в волну с геликоидальным волновым фронтом с помощью спиральной фазовой пластинки; справа от пластинки — волновой фронт пучка для случая $m_l = 1$; стрелки — последовательные позиции вектора Пойнтинга, описывающего винтовую линию [131]

“Закрученность” света с физической точки зрения реализуется в виде необычного пространственного распределения световой волны. Однако если такой свет распространяется сквозь обычную турбулентную атмосферу, то его пространственное распределение может сильно исказиться. Исследования показывают, что если на масштабе отдельной лаборатории передача закрученности по воздуху еще работает, то на километровых расстояниях состояния с разной закрученностью перемешиваются. Это ставит под сомнение практическую пригодность закрученности фотонов для дальнейшей передачи информации. В [133] продемонстрирована достаточно простая и надежная схема передачи информации, закодированной в виде закрученности, на расстояние 3 км. Эксперимент в свободном пространстве проведен в Центральном институте метеорологии и геодинимики и Институте квантовой оптики и квантовой информации (г. Вена, Австрия). Несмотря на турбулентность атмосферы и вызванного ею блуждания лазерного пятна на экране приемника, изображение восстанавливается с высокой точностью; вероятность сбоя пикселя $\sim 1\%$. Анализируя изображения, авторы отмечают атмосферную устойчивость режимов, полученных путем суперпозиции OAM-мод, и возможность их использования для передачи реальной информации (снимки сделаны с Google Earth, ©2014 Google, Cnes/Spot Image, DigitalGlobe). Авторы доказали, что на таких расстояниях турбулентность не препятствует качественной передаче сигнала с помощью АОЛС без каких-либо корректирующих волновых фронт способов и устройств. Эффект достигнут за счет применения к суперпозиции закрученных

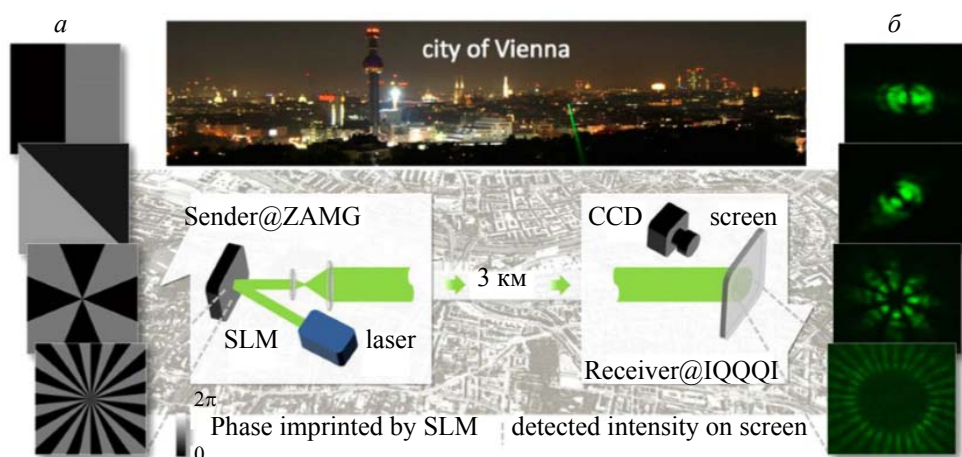


Рис. 22. Эскиз экспериментальной установки (отправитель модулирует 532-нм лазер с помощью пространственного модулятора света (SLM); a — фазовые голограммы, модулирующие пучок, соответствующие суперпозициям OAM-мод (сверху вниз) с $l = \pm 1, \pm 1$ (повернутая на 45° ориентация), ± 4 и ± 15 ; b — передаваемые режимы, записанные с помощью ПЗС-камеры и соответствующие модулированным фазам [133]

состояний со значениями орбитального момента от l до $-l$ некогерентного детектирования и соответствующей обработки сигнала. В результате световой луч дает на экране “многолистник”, в котором $2l$ лепестков (рис. 22, нижний ряд). Эти изображения заметно различаются для разных l . Атмосферная турбулентность несколько искажает форму лепестков, но их количество в подавляющем большинстве случаев неизменно.

Именно суперпозиция закрученных состояний, полученная путем модуляции пучка с помощью фазовых голограмм, не дает потерять информацию из-за турбулентности. Изображение распознается искусственной нейронной сетью, которая самопроизвольно обучается классифицировать изображения. Имеет место качественное восстановление переданного при наличии значительной турбулентности изображения. Всего передано 16 различных модовых суперпозиций ($l = \pm 0, \pm 1, \dots, \pm 15$, l — топологический заряд, определяющий проекцию момента импульса), которые смогли различить со средней частотой ошибок 1.7 %. Примеры изображений, отсылаемых и получаемых таким способом, показаны на рис. 23.

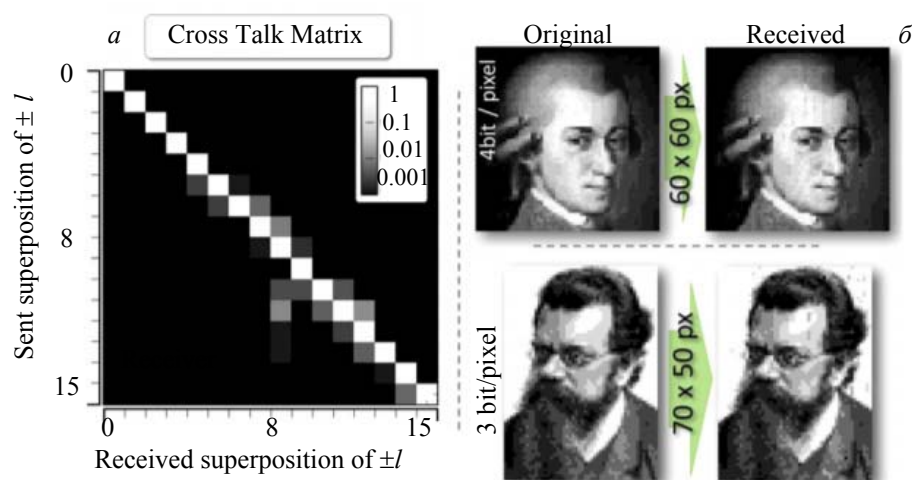


Рис. 23. Матрица перекрестных помех для различных параметров суперпозиции ОАМ-мод (в логарифмическом масштабе); режимы со средней частотой ошибок 1.7 % и пропускной способностью канала 3.89 бит (*a*); *b* — изображения в градациях серого, закодированных в виде суперпозиций ОАМ-мод; верхнее изображение соответствует 16 настройкам оттенков серого (коэффициент битовой ошибки 1.2 %); нижнее — 3 бита на пиксель, 8 различных мод, средняя частота ошибок изображения 0.8 % [133]

В более поздней работе [134] проведено тестирование АОЛС при атмосферной турбулентности на трассе длиной 143 км между Канарскими островами Ла Пальма и Тенерифе. Максимальное расстояние, достигнутое в свободном пространстве, увеличивается в 50 раз по сравнению с достигнутым в [133]. Для кодирования информации использовалась суперпозиция ОАМ-мод ($l = \pm 1, \pm 2$ и ± 3) с различными относительными фазами. Относительные фазы приводят к вращению структуры мод, что позволяет различать эти моды по интенсивности. Метод ранее использовался для исследования качества передачи в классическом [135] и квантовом [136] эксперименте на внутригородском 3-км канале передачи. Для характеристики качества полученного режима записывались изображения распределения интенсивности, наблюдаемые на белой стенке телескопа Observatorio del Teide, и анализировались с помощью алгоритма распознавания образов, основанного на искусственной нейронной сети. При вычислении перекрестных помех обнаружено, что модальная структура может быть достаточно хорошо различима даже без использования адаптивной оптики, корректирующей эффекты атмосферной турбулентности. Без какой-либо активной компенсации эффектов турбулентности обнаружено, что относительные ориентации первых трех суперпозиций мод более высокого порядка могут различаться со средней вероятностью 82 %.

Для демонстрации качества связи передано и успешно декодировано короткое сообщение, закодированное в скрученных световых суперпозициях. Авторы рассматривают этот метод не как реальную коммуникацию, а как демонстрацию качества передачи мод. Следует отметить, что эффективная

толщина атмосферы 6 км [137] значительно меньше достигнутого расстояния связи. Это указывает на то, что связь Земля—спутник с пространственно закодированными ОАМ-модами не ограничивается атмосферной турбулентностью. При этом поперечные пространственные моды света обеспечивают дополнительную степень свободы для кодирования информации как в классической, так и в квантовой коммуникации. В классической связи такие режимы могут использоваться для мультиплексирования информации и увеличения пропускной способности канала связи [138—142]. В [138] отмечено, что одной из особенностей закрученного света является возможность повышения информационной емкости по сравнению с другими характеристиками излучения. Поскольку $l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, набор возможных значений ОАМ теоретически не ограничен, что позволяет кодировать несоизмеримо больше информации по сравнению со стандартными техниками. Таким образом, мультиплексирование ОАМ существенно увеличивает пропускную способность канала связи и позволяет достичь принципиально нового уровня защиты данных. Продемонстрирована АОЛС с высокой (>2 Тб/с) пропускной способностью, достигнутой за счет ОАМ-мультиплексирования.

Заключение. Результаты проведенного анализа свидетельствуют о существенных перспективах применения квантово-каскадных лазеров в атмосферных оптических линиях связи по сравнению с коммерческими системами ввиду их преимуществ принципиального плана. Это связано с уникальной особенностью квантово-каскадных лазеров из-за малого времени жизни электрона (<1 пс) в возбужденном состоянии внутри квантовых ям, что должно обеспечить высокую рабочую частоту и, соответственно, частоту модуляции до 100 ГГц. Последнее делает возможным создание атмосферных оптических линий связи с очень высокой пропускной способностью.

В настоящее время достигнуты скорости передачи данных на уровне 2.5 ГТб/с. Для достижения еще больших скоростей требуется использование высокоэффективных и высокоскоростных цепей управления квантово-каскадных лазеров. На практике такие требования могут быть существенным ограничивающим фактором. Кроме того, ограничивать быстродействие атмосферных оптических линий связи на базе квантово-каскадных лазеров могут “паразитные” электрические элементы конструкции квантово-каскадных лазеров. С учетом того что гетероструктура квантово-каскадных лазеров может иметь особенный дизайн, вклад “паразитных” электрических составляющих может быть разным. Быстродействие атмосферных оптических линий связи на базе квантово-каскадных лазеров ограничивается и фотоприемниками, чувствительность и быстродействие которых ниже, чем в телекоммуникационных фотоприемных устройствах. Необходим выбор оптимального способа кодирования информации, исходя из особенностей каждого квантово-каскадного лазера.

Вследствие значительно большей длины волны излучение в средне- и длинноволновом ИК и терагерцовом диапазонах, распространяясь в атмосфере, претерпевает существенно меньшие потери на рассеяние, чем в ближней и коротковолновой ИК областях. Для мощных ИК квантово-каскадных лазеров это означает, что в окнах прозрачности атмосферы они обладают неоспоримым преимуществом при построении на их основе атмосферных оптических линий связи, предназначенных для осуществления связи на больших расстояниях в неблагоприятных погодных условиях. Фактор длины волны делает излучение квантово-каскадных лазеров более устойчивым к возмущениям (турбулентности) в атмосфере по сравнению с видимым или ближним ИК диапазонами спектра. С точки зрения потерь при наведении увеличение расходимости луча ($\sim \lambda/d$) делает атмосферные оптические линии связи на базе квантово-каскадных лазеров более привлекательными, чем при использовании лазеров, работающих в ближнем и коротковолновом ИК диапазонах.

В особо неблагоприятных погодных условиях атмосферные оптические линии связи для создания канала связи на больших расстояниях (>1 км) должны снабжаться мощными ИК квантово-каскадными лазерами для преодоления потерь на рассеяние, например, в густом тумане, а для смягчения таких атмосферных эффектов, как сцинтилляция или блуждание луча, необходимо использовать, например, адаптивную оптику. Возможны и варианты создания комбинированных атмосферных оптических линий связи с микроволновым каналом [4]. Однако все они приводят к сильному удорожанию атмосферных оптических линий связи. В то же время для высот >6 — 10 км атмосферные оптические линии связи на базе ИК квантово-каскадных лазеров представляют собой наилучший вариант для осуществления дальней связи на расстоянии прямой видимости ~ 100 км, например, между авианесущими бортами без привлечения корректирующей фазовые искажения адаптивной оптики при умеренной мощности ИК квантово-каскадных лазеров (<1 Вт).

Создание в перспективе на базе ИК квантово-каскадных лазеров канала связи с использованием пучков с орбитальным угловым моментом позволит без какой-либо активной компенсации эффектов

турбулентности создать высокоскоростную скрытую взаимную связь Земля—спутник (воздушное судно). Применение в таких системах мощных ИК квантово-каскадных лазеров (>10 Вт) сделает возможным преодоление самых неблагоприятных метеоусловий в виде густых туманов.

Одна из особенностей закрученного света — возможность повышения информационной емкости по сравнению с другими характеристиками излучения. Теоретически неограниченные значения I обеспечивают бесконечный диапазон возможных достижимых состояний ОАМ. Таким образом, ОАМ может значительно увеличить пропускную способность систем связи либо путем кодирования информации в виде состояний ОАМ-пучка, либо путем использования ОАМ-пучков в качестве носителей информации для мультиплексирования. Например, продемонстрирована атмосферная оптическая линия связи с высокой пропускной способностью (>2 Тб/с), достигнутой за счет ОАМ-мультиплексирования. Решение этой задачи для ИК квантово-каскадных лазеров делает атмосферные оптические линии связи на их основе особенно привлекательными.

Помимо быстрого действия терагерцовые квантово-каскадные лазеры обладают еще одним явным преимуществом по сравнению с другими источниками когерентного излучения: высокой степенью устойчивости к атмосферной турбулентности. Однако сильное поглощение терагерцового излучения парами воды ограничивает область применения атмосферных оптических линий связи на базе терагерцовых квантово-каскадных лазеров расстояниями ≤ 100 м. Тем не менее терагерцовые квантово-каскадные лазеры в силу уникальных свойств излучения найдут применение в таких областях, как беспроводная связь на расстояниях <100 м в городских условиях, беспроводная когнитивная обработка данных и удаленные вычисления (например, для передачи на Землю с беспилотных летательных аппаратов большого объема данных для их обработки на Земле и для управления беспилотными летательными аппаратами в режиме реального времени).

- [1] **R. Martini, E. A. Whittaker.** In: *Free-Space Laser Communications*, Springer, New York (2005) 393—406
- [2] **F. Capasso, C. Gmachl, R. Paiella, A. Tredicucci, A. L. Hutchinson, D. Sivco, J. Baillargeon, A. Y. Cho, H. C. Liu.** *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.*, **6**, N 6 (2000) 931—947
- [3] **A. Vats, H. Kaushal, V. K. Jain.** *Int. Conf. Telecommunication and Networking (TELNET 2013)*, Amity University, Noida, February 2013 (2013)
- [4] **J. Mikołajczyk, Z. Bielecki, M. Bugajski, J. Piotrowski, J. Wojtas, W. Gawron, D. Szabra, A. Prokopiuk.** *Metrol. Measur. Syst.*, **24**, N 4 (2017) 653—674
- [5] **F. Capasso, R. Paiella, R. Martini, R. Colombelli, C. Gmachl, T. Myers, M. Taubman, R. Williams, C. Bethea, K. Unterrainer, H. Hwang, D. Sivco, Y. Cho, A. Sergent, C. Liu, E. Whittaker.** *IEEE J. Quantum Electron.*, **38**, N 6 (2002) 511—532
- [6] **J. Mikołajczyk.** *Int. J. Electron. Telecommun.*, **60**, N 3 (2014) 259—264
- [7] **S. M. Johnson, E. Dial, M. Razeghi.** In: *Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XVII*, *Int. Soc. Opt. Photon.*, **11288** (2020) 1128814
- [8] **V. W. Chan.** *J. Lightwave Technol.*, **24**, N 12 (2006) 4750—4762
- [9] **M. A. Khalighi, M. Uysal.** *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, **16**, N 4 (2014) 2231—2258
- [10] **D. M. Forin, G. Incerti, G. T. Beleffi, A. L. J. Teixeira, L. N. Costa, P. D. B. Andrè, B. Geiger, E. Leitgeb, F. Nadeem.** *Trends in Telecommunications Technologies*, IntechOpen (2010) 257—296
- [11] **M. Uysal, J. Li, M. Yu.** *Transact. Wireless Commun.*, **5**, N 6 (2006) 1229—1233
- [12] **H. Henniger, O. Wilfert.** *Radioengineering*, **19** (2010) 2
- [13] **M. Vitiello, G. Scalari, B. Williams, B. Natale.** *Opt. Express*, **23**, N 4 (2015) 5167—5182
- [14] **M. Razeghi, Q. Lu, N. Bandyopadhyay, W. Zhou, D. Heydari, Y. Bai, S. Slivken.** *Opt. Express*, **23**, N 7 (2015) 8462—8475
- [15] **R. Curl, F. Capasso, C. Gmachl, A. Kosterev, B. McManus, R. Lewicki, M. Pusharsky, G. Wysocki, F. Tittel.** *Chem. Phys. Lett.*, **487** (2010) 1—18
- [16] **A. Lyakh, R. Maulini, A. Tsekoun, R. Go, C. Pflugl, L. Diehl, Q. Wang, F. Capasso, K. C. N. Patel.** *Appl. Phys. Lett.*, **95**, N 14 (2009) 14113-1—14113-9
- [17] **M. I. Amanti, G. Scalari, R. Terazzi, M. Fischer, M. Beck, J. Faist, A. Rudra, P. Gallo, E. Kapon.** *New J. Phys.*, **11**, N 12 (2009) 125022—125041
- [18] **J. Faist, D. Hofstetter, M. Beck, T. Aellen, M. Rochat, S. Blaser.** *IEEE J. Quantum Electron.*, **38**, N 6 (2002) 533—546

- [19] A. Tredicucci, F. Capasso, C. Gmachl, D. Sivco, A. Hutchinson, A. Cho. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, N 15 (1998) 2101—2103
- [20] J. Faist, M. Beck, T. Aellen, E. Gini. *Appl. Phys. Lett.*, **78**, N 2 (2001) 147—149
- [21] M. Belkin, F. Capasso. *Phys. Scripta*, **90**, N 1 (2015) 118002-13
- [22] B. Williams, S. Kumar, Q. Hu, J. Reno. *Electron. Lett.*, **42**, N 2 (2006) 89—91
- [23] A. Lee, B. Williams, S. Kumar, Q. Hu, J. Reno. *Opt. Lett.*, **7**, N 35 (2010) 910—912
- [24] B. Williams. *Nature Photon.*, **1**, N 9 (2007) 517
- [25] П. И. Абрамов, Е. В. Кузнецов, Л. А. Скворцов. *Опт. журн.*, **84**, № 5 (2017) [P. I. Abramov, E. V. Kuznetsov, L. A. Skvortsov. *J. Opt. Technol.*, **84**, N 5 (2017) 331—341]
- [26] M. Dongdong, Z. Hongbo, Li Mingshan, Lin Weiran, Shen Zhaoguo, Zhang Jie, Fan Zhongwei. *Infrared and Laser Engin.*, **47**, N 11 (2018) 1105009
- [27] S. Li, B. Wu, F. Wu, G. Zhou, X. Bi, C. An, Q. Liu, R. Yang, J. Wang, Yu Li, J. Cai, X. Yan. In: 14th Nat. Conf. Laser Technol. Optoelectron. (LTO 2019), *Int. Soc. Opt. Photon.*, **11170** (2019) 111702Z
- [28] S. Slivken, M. Razeghi. In: Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XVI, *Int. Soc. Opt. Photon.*, **10926** (2019) 1092611
- [29] S. Li, R. Yang, F. Wu, G. Zhou, X. Bi, C. An, Q. Liu, J. Wang, Z. Wu, J. Cai, X. Yan. In: *Semicond. Las. Applicat.*, IX, *Int. Soc. Opt. Photon.*, **11182** (2019) 111820Y
- [30] F. Münzhuber, R. G. Speer. In: Technologies for Optical Countermeasures XV, *Int. Soc. Opt. Photon.*, **10797** (2018) 107970M
- [31] G. D. Lewis, C. N. Santos, M. Vandewal. In: Technologies for Optical Countermeasures XVI, *Int. Soc. Opt. Photon.*, **11161** (2019) 1116108
- [32] O. Spitz, A. Herdt, J. Wu, G. Maisons, M. Carras, C. W. Wong, F. Elsaesser, F. Grillot. In: Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XVII, *Int. Soc. Opt. Photon.*, **11288** (2020) 112880A
- [33] Л. А. Скворцов, Е. М. Максимов. *Квант. электрон.*, **40**, № 7 (2010) 565—578 [L. A. Skvortsov, E. M. Maksimov. *Quantum Electron.*, **40**, N 7 (2010) 565—578]
- [34] Л. А. Скворцов. *Квант. электрон.*, **41**, № 12 (2011) 1051—1060 [L. A. Skvortsov. *Quantum Electron.*, **41**, N 12 (2011) 1051—1060]
- [35] Л. А. Скворцов. *Квант. электрон.*, **42**, № 1 (2012) 1—11 [L. A. Skvortsov. *Quantum Electron.*, **42**, N 1 (2012) 1—11]
- [36] C. Bauer, U. Willer, W. Schade. *Opt. Engin.*, **49**, N 11 (2010) 111126
- [37] X. Chen, D. Guo, F. S. Choa, C. C. Wang, S. Trivedi, A. P. Snyder, G. Ru, J. Fan. *Appl. Opt.*, **52**, N 12 (2013) 2626—2632
- [38] A. Mukherjee, S. Von der Porten, C. K. N. Patel. *Appl. Opt.*, **49**, N 11 (2010) 2072—2078
- [39] C. A. Kendziora, R. Furstenberg, M. Papantonakis, V. Nguyen, J. Byers, R. McGill. *Appl. Opt.*, **54**, N 31 (2015) F129—F138
- [40] J. D. Suter, B. Bernacki, M. C. Phillips. *Appl. Phys. B*, **108**, N 4 (2012) 965—974
- [41] П. И. Абрамов, Е. В. Кузнецов, Л. А. Скворцов, М. И. Скворцова. *Журн. прикл. спектр.*, **86**, № 1 (2019) 5—32 [P. I. Abramov, E. V. Kuznetsov, L. A. Skvortsov, M. I. Skvortsova. *J. Appl. Spectr.*, **86**, N 1 (2019) 1—26]
- [42] K. Hashimura, K. Ishii, K. Awazu. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **54**, N 11 (2015) 112701
- [43] N. Masaki, S. Okazaki. *Biomed. Opt. Express*, **9**, N 5 (2018) 2095—2103
- [44] K. Hashimura, K. Ishii, K. Awazu. *Opt. Rev.*, **23**, N 2 (2016) 299—306
- [45] M. J. Pilling, A. Henderson, P. Gardner. *Analyt. Chem.*, **89**, N 14 (2017) 7348—7355
- [46] K. Wörle, F. Seichter, A. Wilk, C. Armacost, T. Day, M. Godejohann, U. Wachter, J. Vogt, P. Radermacher, B. Mizaikoff. *Analyt. Chem.*, **85**, N 5 (2013) 2697—2702
- [47] A. Kosterev, G. Wysocki, Y. Bakhirkin, S. So, R. Lewicki, M. Fraser, F. Tittel, R. F. Curl. *Appl. Phys. B*, **90**, N 2 (2008) 165—176
- [48] A. A. Kosterev, F. K. Tittel. *IEEE J. Quantum Electron.*, **38**, N 6 (2002) 582—591
- [49] R. F. Curl, F. Capasso, C. Gmachl, A. A. Kosterev, B. McManus, R. Lewicki, M. Pusharsky, G. Wisocki, F. K. Tittel. *Chem. Phys. Lett.*, **487**, N 1-3 (2010) 1—18
- [50] G. N. Rao, A. Karpf. *Appl. Opt.*, **50**, N 4 (2011) A100—A115
- [51] L. Zhang, G. Tian, J. Li, B. Yu. *Appl. Spectr.*, **68**, N 10 (2014) 1095—1107
- [52] G. Wysocki, Y. Bakhirkin, S. So, F. K. Tittel, C. J. Hill, R. Q. Yang, M. P. Fraser. *Appl. Opt.*, **46**, N 33 (2007) 8202—8210

- [53] **B. A. Paldus, T. G. Spence, R. N. Zare, J. Oomens, F. J. M. Harren, D. H. Parker, C. Gmachl, F. Capasso, D. L. Sivco, J. N. Baillargeon, A. L. Hutchinson, A. Y. Cho.** *Opt. Lett.*, **24**, N 3 (1999) 178—180
- [54] **B. A. Paldus, C. C. Harb, T. G. Spence, R. N. Zare, C. Gmachl, F. Capasso, D. L. Sivco, J. N. Baillargeon, A. L. Hutchinson, A. Y. Cho.** *Opt. Lett.*, **25**, N 9 (2000) 666—668
- [55] **G. Wysocki, R. Lewicki, R. F. Curl, F. K. Tittel, L. Diehl, F. Capasso, M. Troccoli, G. Hofler, D. Bour, S. Corzine, R. Maulini, M. Giovannini, J. Faist.** *Appl. Phys. B*, **92**, N 3 (2008) 305—311
- [56] **Y. Wang, M. G. Soskind, W. Wang, G. Wysocki.** *Appl. Phys. Lett.*, **104**, N 3 (2014) 031114
- [57] **L. Zhang, G. Tian, J. Li, B. Yu.** *Appl. Spectr.*, **68**, N 10 (2014) 1095—1107
- [58] **A. Schwaighofer, M. Brandstetter, B. Lendl.** *Chem. Soc. Rev.*, **46**, N 19 (2017) 5903—5924
- [59] **H. W. Hübers, R. Eichholz, S. G. Pavlov, H. Richter.** *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, **34**, N 5-6 (2013) 325—341
- [60] **B. Rösen, X. Lü, K. Biermann, L. Schrottke, H. T. Grahn.** *J. Appl. Phys.*, **125**, N 15 (2019) 151613
- [61] **N. J. Galán-Freyre, M. L. Ospina-Castro, A. R. Medina-González, R. Villarreal-González, S. P. Hernández-Rivera, L. C. Pacheco-Londoño.** *Appl. Sci.*, **10**, N 4 (2020) 1319
- [62] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmosferaerisk_spredning-ru.svg
- [63] **K. J. Linden, W. R. Neal, J. Waldman, A. J. Gatesman, A. Danylov.** In: 34th Applied Imagery and Pattern Recognition Workshop (AIPR'05) Washington, DC (2005) 8—14
- [64] **C. P. Colvero, M. C. R. Cordeiro, J. P. von der Weid.** *Electron. Lett.*, **41**, N 10 (2005) 610
- [65] **E. Korevaar, I. Kim, B. McArthur.** *Proc. SPIE*, **4873** (2002) 155
- [66] **P. W. Kruse, L. D. McLaughlin, R. B. McQuistan.** *Elements of Infrared Technology: Generation, transmission, and Detection*, John Wiley & Sons, New York (1962)
- [67] **E. J. McCartney.** *Optics of the Atmosphere Scattering by Molecules and Particles*, John Wiley & Sons, New York (1976)
- [68] **P. Corrigan, R. Martini, E. A. Whittaker, C. Bethea.** *Opt. Express*, **17**, N 6 (2009) 4355—4359
- [69] **R. B. Stull.** *Atmospheric Sciences Library: An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publishers (1988)
- [70] **E. Luzhansky, F. S. Choa, S. Merritt, A. Yu, M. Krainak.** In: *Laser Radar Technology and Applications XX; and Atmospheric Propagation XII*, **9465**, Int. Soc. Opt. Photon., 2015, May (2015)
- [71] **A. N. Zaki Rashed, H. A. Sharshar.** *Int. J. Adv. Res. Electron. Commun. Engin.*, **3** (2014) 261—272
- [72] **G. P. Berman, A. A. Chumak, V. N. Gorshkov.** *Phys. Rev. E*, **76**, N 5 (2007) 056606-1—056606-7
- [73] **F. Zocchi.** *Opt. Commun.*, **248** (2005) 359
- [74] **Y. Wang, H. Xu, D. Li, R. Wang, C. Jin, X. Yin, S. Gao, Q. Mu, Li Xuan, Z. Cao.** *Sci. Rep.*, **8** (2018) 1124—1135
- [75] **K. Kazaura, K. Omae, T. Suzuki, M. Matsumoto, T. Sato, K. Asatani, M. Hatori, T. Murakami, K. Takahashi, H. Matsumoto, K. Wakamori, Y. Arimoto, K. Wakamori.** In: *Free-Space Laser Communication Technologies XVIII*, **6105**, 61050N, Int. Soc. Opt. Photon., 2006, March (2006)
- [76] **H. Willebrand, B. Ghuman.** *Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks*. Sams Publishing, Indianapolis, Indiana USA (2002)
- [77] **M. Grabherr, M. Miller, R. Jäger, D. Wiedenmann, R. King.** In: *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers VIII*, **5364**, 174—182, Int. Soc. Opt. Photonics, 2004, June (2004)
- [78] **G. Soni, J. Malhotra.** *Int. J. Comput. Corporate Res.*, **1**, N 4 (2011) 24—47
- [79] **R. Martini, C. Bethea, F. Capasso, C. Gmachl, R. Paiella, E. A. Whittaker, C. Gmachl, R. Paiella, H. Y. Hwang, D. K. Sivco, J. N. Baillargeon, A. J. Cho.** *Electron. Lett.*, **38**, N 4 (2002) 181—183
- [80] **F. Capasso, R. Colombelli, R. Paiella, C. Gmachl, A. Tredicucci, D. L. Sivco, A. Y. Cho.** *Opt. Photon. News*, **12** (2001) 41—46
- [81] **F. Capasso, C. Gmachl, D. L. Sivco, A. Y. Cho.** *Phys. Today*, **55** (2002) 34—40
- [82] **J. Faist, F. Capasso, C. Sirtori, D. L. Sivco, A. Y. Cho.** In: *Quantum Cascade Lasers in Intersubband Transition in Quantum Wells: Physics and Device Application II*, Eds. H. C. Liu and F. Capasso, New York, Academic, ch. VIII (2000)
- [83] **C. Y. L. Cheung, K. A. Shore.** *J. Mod. Opt.*, **45** (1998) 1219—1221
- [84] **D. M. Chate, T. S. Pranesha.** *J. Aerosol Sci.*, **35** (2004) 695—706
- [85] **E. Luzhanskiy, F. S. Choa, S. Merritt, A. Yu, M. Krainak.** *Low Size, Weight and Power Concept for Mid-Wave Infrared Optical Communication Transceivers Based on Quantum Cascade Lasers*, preprint, NASA (2015)

- [86] **E. Luzhansky, F. S. Choa, S. Merritt, A. Yu, M. Krainak.** In: Laser Radar Technology and Applications XX, and Atmospheric Propagation XII, 9465, 946512, Int. Soc. Opt. Photon., 2015, May (2015)
- [87] **E. Luzhansky, F. S. Choa, S. Merritt, A. Yu, M. Krainak.** In: Applications of Lasers for Sensing and Free Space Communications, JT5A-7, Opt. Soc. Am., 2015, June (2015)
- [88] **S. Thomas.** Proc. SPIE, **5490** (2004) 766
- [89] **B. Moision, J. Hamkins.** “Coded Modulation for the Deep-Space Optical Channel: Serially Concatenated Pulse-Position Modulation”, IPN Progress Report 42-161, May 15 (2005)
- [90] **A. Rogalski.** Prog. Quantum Electron., **27**, N 2-3 (2003) 59—210
- [91] **J. J. Fernandes, P. A. Watson, J. C. Neves.** IEEE Commun. Mag., **32**, N 8 (1994) 68—73
- [92] **A. Rogalski, F. Sizov.** Opto-Electron. Rev., **19**, N 3 (2011) 346—404
- [93] **J. Eckhardt.** IEEE 802.15-19-0279-00-0thz, July 2019. [Online]. Available: <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/19/15-19-0279-00-0thz-low-thz-band-propagation-measurements-for-beyond-5g-vehicular-communications.pdf>
- [94] **I. F. Akyildiz, C. Han, S. Nie.** IEEE Commun. Magaz., **56**, N 6 (2018) 102—108
- [95] **P. D. Grant, S. R. Laframboise, R. Dudek, M. Graf, A. Bezinger, H. C. Liu.** Electron. Lett., **45**, N 18 (2009) 952—954
- [96] **Z. Chen, Z. Y. Tan, Y. J. Han, R. Zhang, X. G. Guo, H. Li, J. C. Cao, H. C. Liu.** Electron. Lett., **47**, N 17 (2011) 1002—1004
- [97] **H. Kanaya, R. Sogabe, T. Maekawa, S. Suzuki, M. Asada.** J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, **35**, N 5 (2014) 425—431
- [98] **H. Elayan, O. Amin, B. Shihada, R. M. Shubair, M. S. Alouini.** IEEE Open J. Commun. Soc., **1** (2019) 1—32
- [99] **S. Chinchali, A. Sharma, J. Harrison, A. Elhafsi, D. Kang, E. Pergament, E. Cidon, S. Katti, M. Pavone.** Network Offloading Policies for Cloud Robotics: A Learning-based Approach, Feb. 2019, arXiv:1902.05703. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1902.05703>
- [100] **G. Z. Yang, J. Bellingham, P. E. Dupont, P. Fischer, L. Floridi, R. Full, N. Jacobstein, M. McNutt, R. Merrifield, B. J. Nelson, B. Scassellati, M. Taddeo, R. Taylor, M. Z. Lin Wang, R. Wood.** Sci. Robot., **3**, N 14 (2018) 7650—7664
- [101] **M. Chen, Y. Tian, G. Fortino, J. Zhang, I. Humar.** Comput. Commun., **120** (2018) 58—70
- [102] **Л. А. Скворцов.** Журн. прикл. спектр., **81**, № 5 (2014) 653—678 [L. A. Skvortsov. J. Appl. Spectr., **81**, N 5 (2014) 725—749]
- [103] **H. Aggrawal, P. Chen, M. Assefzadeh, B. Jamali, A. Babakhani.** IEEE Microw. Mag., **17**, N 12 (2016) 24—38
- [104] **M. Tonouchi.** Nature Photon., **1**, N 2 (2007) 97—105
- [105] **X.-F. Teng, Y.-T. Zhang, C.C.Y. Poon, P. Bonato.** IEEE Rev. Biomed. Eng., **1**, N 1 (2008) 62—74
- [106] **D. M. Mittleman, R. H. Jacobsen, R. Neelamani, R. G. Baraniuk, M. C. Nuss.** Appl. Phys. B, **67**, N 3 (1998) 379—390
- [107] **M. J. W. Rodwell, Y. Fang, J. Rode, J. Wu, B. Markman, S. T. Š. Brunelli, J. Klamkin, M. Urteaga.** IEDM Tech. Dig. (2018) 14.3.1—14.3.4
- [108] **D. M. Mittleman.** Opt. Express, **26**, N 8 (2018) 9417—9431
- [109] **M. Aladsani, A. Alkhateeb, G. C. Trichopoulos.** Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process (ICASSP), May 2019 (2019) 4539—4543
- [110] **T. Rappaport, Y. Xing, G. R. MacCartney, A. F. Molisch Jr., E. Mellios, J. Zhang.** IEEE Trans. Antennas Propag., **65**, N 12 (2017) 6213—6230
- [111] **I. F. Akyildiz, J. M. Jornet, C. Han.** Phys. Commun., **1**, N 12 (2014) 16—32
- [112] **V. Petrov, D. Moltchanov, Y. Koucheryavy.** Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC), May 2016 (2016) 1—7
- [113] **V. Petrov, A. Pyattaev, D. Moltchanov, Y. Koucheryavy.** Proc. 8th Int. Congr. Ultra Modern Telecommun. Control Syst. Workshops (ICUMT), Oct. 2016 (2016) 183—190
- [114] **S. Koenig, D. Lopez-Diaz, J. Antes, F. Boes, R. Henneberger, A. Leuther, A. Tessmann, R. Schmogrow, D. Hillerkuss, R. Palmer, T. Zwick, C. Koos, W. Freude, O. Ambacher, J. Leuthold, I. Kallfass.** Nature Photon., **1**, N 7 (2013) 977—981
- [115] **T. S. Rappaport.** 6G and beyond: Terahertz Communications and Sensing, 2019 Brooklyn 5G Summit Keynote, Apr. 2019. [Online]. Available: <https://ieeetv.ieee.org/conference-highlights/keynote-tedrappaport-terahertz-communication-b5gs-2019?>

- [116] **M. Aladsani, A. Alkhateeb, G. C. Trichopoulos.** Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process. (ICASSP), May 2019 (2019) 4539—4543
- [117] **O. Kanhere, T. S. Rappaport.** Proc. IEEE Global Commun. Conf., Dec. 2018 (2018) 206—212
- [118] **C. Paterson.** Phys. Rev. Lett., **94**, N 15 (2005) 153901
- [119] **G. A. Tyler, R. W. Boyd.** Opt. Lett., **34**, N 2 (2009) 142—144
- [120] **N. Chandrasekaran, J. H. Shapiro, J. Lightwave.** Technol., **32**, N 6 (2014) 1075—1087
- [121] **F. S. Roux, T. Wellens, V. N. Shatokhin.** Phys. Rev. A, **92**, N 1 (2015) 012326
- [122] **H. Avetisyan, C. H. Monken.** Opt. Express, **24**, N 3 (2016) 2318—2335
- [123] **C. Chen, H. Yang, S. Tong, Y. Lou.** Opt. Express, **24**, N 7 (2016) 6959—6975
- [124] **N. D. Leonhard, V. N. Shatokhin, A. Buchleitner.** Phys. Rev. A, **91**, N 1 (2015) 012345
- [125] **B. J. Pors, C. H. Monken, E. R. Eliel, J. P. Woerdman.** Opt. Express, **19**, N 7 (2011) 6671—6683
- [126] **M. Malik, M. O’Sullivan, B. Rodenburg, M. Mirhosseini, J. Leach, M. P. Lavery, M. J. Padgett, R. W. Boyd.** Opt. Express, **20**, N 12 (2012) 13195—13200
- [127] **A. H. Ibrahim, F. S. Roux, M. McLaren, T. Konrad, A. Forbes.** Phys. Rev. A, **88**, N 1 (2013) 012312
- [128] **Y. Ren, H. Huang, G. Xie, N. Ahmed, Y. Yan, B. I. Erkmen, N. Chandrasekaran, M. P. J. Lavery, N. K. Steinhoff, M. Tur, S. Dolinar, M. Neifeld, M. J. Padgett, R. W. Boyd, J. H. Shapiro, A. E. Willner.** Opt. Lett., **38**, N 20 (2013) 4062—4065
- [129] **B. Rodenburg, M. Mirhosseini, M. Malik, O. S. Magaña-Loaiza, M. Yanakas, L. Maher, N. K. Steinhoff, G. A. Tyler, R. W. Boyd.** New J. Phys., **16**, N 3 (2014) 033020
- [130] **G. Xie, L. Li, Y. Ren, H. Huang, Y. Yan, N. Ahmed, Z. Zhao, M. P. J. Lavery, N. Ashrafi, S. Ashrafi, R. Bock, M. Tur, A. F. Molisch, A. E. Willner.** Optica, **2**, N 4 (2015) 3357—3365
- [131] **Б. А. Князев, В. Г. Сербо.** Успехи физ. наук, **188**, № 5 (2018) 508—539 [B. A. Knyazev, V. G. Serbo. Phys. Uspekhi, **61**, N 5 (2018) 449—479]
- [132] **L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, J. P. Woerdman.** Phys. Rev. A, **45**, N 11 (1992) 8185
- [133] **M. Krenn, R. Fickler, M. Fink, J. Handsteiner, M. Malik, T. Scheidl, R. Ursin, A. Zeilinger.** New J. Phys., **16**, N 11 (2014) 113028
- [134] **M. Krenn, J. Handsteiner, M. Fink, R. Fickler, R. Ursin, M. Malik, A. Zeilinger.** Proc. Nat. Acad. Sci., **113**, N 48 (2016) 13648—13653
- [135] **M. Krenn, J. Handsteiner, M. Fink, R. Fickler, A. Zeilinger.** Proc. Natl. Acad. Sci., **112**, N 46 (2015) 14197—14201
- [136] **C. F. Bohren, B. A. Albrecht.** Atmospheric Thermodynamics, Oxford Univ Press, New York (1988)
- [137] **G. Gibson, J. Courtial, M. Padgett, M. Vasnetsov, V. Pas’ko, S. Barnett, S. Franke-Arnold.** Opt. Express, **12**, N 22 (2004) 5448—5456
- [138] **J. Wang, Yang Jeng-Yuan; I. M. Fazal, N. Ahmed, Y. Yan, H. Huang, Y. Ren, Y. Yue, S. Dolinar, M. Tur, A. E. Willner.** Nature Photon., **6**, N 7 (2012) 488—496
- [139] **H. Huang, G. Xie, Y. Yan, N. Ahmed, Y. Ren, Y. Yue, D. Rogawski, M. J. Willner, B. I. Erkmen, K. M. Birnbaum, S. J. Dolinar, M. P. J. Lavery, M. J. Padgett, M. Tur, A. E. Willner.** Opt. Lett., **39**, N 2 (2014) 197—200
- [140] **G. Milione, M. P. J. Lavery, H. Huang, Y. Ren, G. Xie, T. A. Nguyen, E. Karimi, L. Marrucci, D. A. Nolan, R. R. Alfano, A. E. Willner.** Opt. Lett., **40**, N 9 (2015) 1980—1983
- [141] **A. E. Willner, H. Huang, Y. Yan, Y. Ren, N. Ahmed, G. Xie, C. Bao, Z. Zhao, L. Li, Y. Cao, J. Wang, M. P. J. Lavery, M. Tur, S. Ramachandram, A. F. Molisch, N. Ashrafi, S. Ashrafi.** Adv. Opt. Photon., **7**, N 1 (2015) 66—106
- [142] **B. Thidé, F. Tamburini, H. Then, C. G. Someda, R. A. Ravanelli.** arXiv:1410.4268 (2014)