

УДК 621.391

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МИМО В ОТКРЫТЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ НЕПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ



В.С. МАРЧУК

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Abstract – It is proposed to use MIMO technology in NLOS systems. The system operates in the optical short-wave ultraviolet range of radio waves. MIMO technology uses orthogonal polarization multiplexing of coherent laser radiation from two sources. Spatial channels use the reflection from spatially separated regions of molecular scattering. Another proposal to increase the reliability of the NLOS system is to increase the radiation power on the transmitting side by using a group of laser sources instead of one. The third proposal in the work is the integration of laser sources with an array of optical fibers. The array of optical fibers forms a radiating aperture. This solution allows us to solve the problem of controlling the shape of the radiation pattern of the radiating aperture. Suggestions are made to reduce the level of lateral radiation and spurious polarization due to the diagonal elements of the matrix of the radio channel.

Анотація – Запропоновано в системах NLOS використовувати технологію МІМО, яка працює в оптичному короткохвильовому ультрафіолетовому діапазоні радіохвиль при використанні ортогонального поляризаційного мультиплексування когерентного лазерного випромінювання від двох джерел. Другою пропозицією по збільшенню надійності системи NLOS є збільшення потужності випромінювання на передавальній стороні за рахунок використання групи лазерних випромінювачів замість одного. Третьою пропозицією в роботі є інтеграція лазерних випромінювачів з ґраткою світловодів, яка формує випромінюючу апертуру. Наведені пропозиції по зниженню рівня бокового випромінювання і паразитної поляризації за рахунок діагональних елементів матриці радіоканалу.

Аннотация – Предлагается в системах NLOS использовать технологию МІМО, которая работает в оптическом коротковолновом ультрафиолетовом диапазоне радиоволн с применением ортогонального поляризационного мультиплексирования когерентного лазерного излучения от двух источников. Другим предложением по увеличению надежности системы NLOS является увеличение мощности излучения на передающей стороне за счет использования группы лазерных источников вместо одного. Третьим предложением в работе является интеграция лазерных источников с решеткой из световодов, которая формирует излучающую апертуру. Приведены предложения по снижению уровня бокового излучения и паразитной поляризации за счет диагональных элементов матрицы радиоканала.

Введение

Развитие техники открытых оптических систем связи FSO (Free Space Optics) привело к появлению нового направления NLOS (Non Line Of Sight) открытых оптических систем связи не прямой видимости, среди которых наиболее известны системы NLOS UV (Ultra Violet) ультрафиолетового диапазона, его коротковолновой части [1-7] и др. Известны системы с дальностью связи в сотни метров для обмена телеметрией с автономными электронными датчиками в военной технике для связи с рассредоточенной техникой на поле военных действий [2]; для организации линий связи при геодезических и геологических работах [5]; для управления подвижными объектами [6]. В работе [4] представлены результаты экспериментальных исследований системы оптико-электронной связи в диапазоне UV на рассеянном излучении.

Постановка задачи. Суть метода организации связи в NLOS UV системах – это

использование рассеяния оптического излучения на молекулах воздуха от передающего устройства и последующего приема отраженных волн приемным устройством, находящимся не на линии прямой видимости. Наиболее известны системы связи в ультрафиолетовом диапазоне волн UV $\lambda = 250\div 270$ нм.

Концепция NLOS ультрафиолетовой связи основана на использовании двух явлений, связанных между собой. Первое – известно, что атмосферные газы, особенно озон и кислород, сильно поглощают свет в спектральной области между 200 нм и 280 нм. Суммарное солнечное излучение, достигающее земли в этом диапазоне волн, незначительное. В сущности, в этой области спектра всегда темно, независимо от времени суток. Второе явление в этой области спектра связано с тем, что ультрафиолетовый свет, сгенерированный у земной поверхности, сильно рассеивается на молекулах воздуха.

В сложных метеорологических условиях доминирует явление «аэрозольного» рассеяния, или рассеяния Ми. В этом случае рассеивателями являются многочисленные частицы воды, либо ее паров, а также различные пылевые частицы, содержащиеся в атмосфере. Коэффициент аэрозольного рассеяния, как правило, на порядок превышает коэффициент молекулярного, что позволяет уменьшать чувствительность приемников рассеянного оптического сигнала, однако сильная пространственная и временная неоднородность аэрозолей в атмосфере не позволяет реализовать стабильный оптический канал связи без прямой видимости [5].

Важной характеристикой таких систем связи является нечувствительность к преградам на местности. Системы связи UV диапазона могут обеспечивать более высокую доступность, чем радиосвязь, не только на незастроенных территориях, но также и в городской среде, где здания и другие преграды часто порождают потери в радио диапазоне.

Существующие решения систем NLOS UV основаны на использовании технологии point to point (точка-точка) с одним пространственным каналом SISO (Single Input Single Output) [5, 6] на одиночном лазере. В работе [2] представлена система с антенными решетками из светодиодов, являющихся некогерентными источниками. Они служат в передающем устройстве для увеличения суммарной излучаемой оптической мощности одноканальной системы и создают широкий угол излучения.

При создании таких систем имеется ряд нерешенных проблем:

- разработка излучателей полупроводниковых светодиодов и лазеров для ультрафиолетового диапазона большой мощности;
- фотодетекторов UV диапазона высокой чувствительности с низким уровнем темнового тока с фильтрами, блокирующими видимое излучение;
- обеспечение низкого уровня коэффициента битовых ошибок (Bit Error Rate, BER) для цифровых телекоммуникационных систем в условиях неустойчивого поведения процессов рассеяния в атмосфере во времени.

Если первые две проблемы решаемы, то неустойчивость процессов при отражении приходящих от передатчика волн в атмосфере обусловлена природными явлениями и изменить их не представляется возможным.

Для уменьшения влияния природных факторов на работу системы связи в данной работе предлагается ввести в систему два пространственных канала с отражением от разных областей атмосферы, разнесенных в пространстве и в малой степени влияющих друг на друга. Предлагается модифицировать технологию ММО (Multiple Input Multiple Output), широко используемую в радиодиапазоне, с учетом особенностей оптического диапазона UV и процессов в атмосфере.

Естественно, что увеличение надежности связи можно также получить за счет увеличения мощности источника излучения в передающем устройстве.

В данной работе предлагается для увеличения мощности излучения использовать в передатчиках UV диапазона решетки из световодов, которые объединяются с лазерными источниками, имеющими достаточно большие габариты.

I. Использование оптической ММО системы для повышения надежности связи

Вспользуемся рядом фундаментальных положений для оптических волн [8,9]. Для канала с рассеянием наиболее целесообразно использовать ультрафиолетовый (UV) диапазон спектра. В UV-диапазоне коэффициент рассеяния значительно выше, чем в инфракрасном (IR) диапазоне. Для обеспечения стабильной работы системы связи целесообразно использовать молекулярное рассеяние света UV диапазона. При молекулярном рассеянии имеет место Рэлеевское рассеяние. При Рэлеевском рассеянии частота отраженного света равна частоте падающего. Если в качестве источника использовать лазер, генерирующий плоско поляризованный свет, то и рассеянный свет при молекулярном рассеянии будет плоско поляризованным, т.е. имеет линейную поляризацию.

Векторы \vec{E} и \vec{H} перпендикулярны друг другу и перпендикулярны к направлению распространения волны, т.е. имеют место поперечные волны. Диаграмма направленности излучения рассеянного света из следствия формулы Рэля имеет вид, представленный на рис. 1.

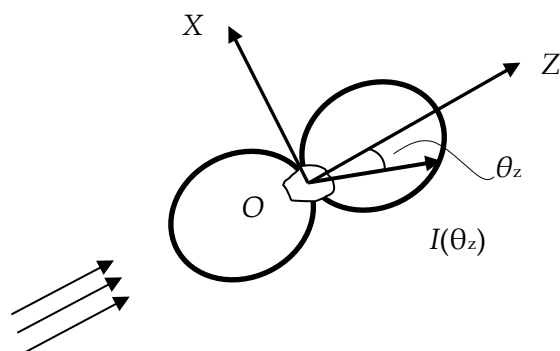


Рис. 1. Диаграмма направленности рассеянного света

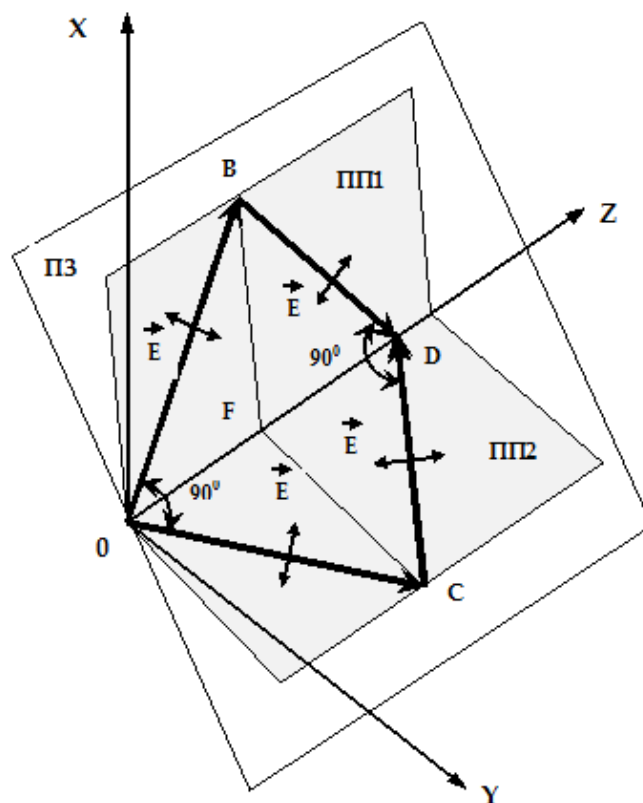
Нормированная функция направленности рассеянного света по мощности имеет вид

$$I(\theta_z) = \cos^2 \theta_z.$$

Діаграма Рэлея являється об'ємною. Из формулы Рэлея следует, что рассеянный свет, как и падающий, поляризован в плоскости OXZ. Два световых луча, линейно поляризованных под прямым углом друг к другу, не интерферируют. Вышеперечисленные положения важны для разработки NLOS UV системы с технологией MIMO оптического диапазона.

Предлагается построить NLOS систему связи MIMO 2x2 с ортогональностью векторов \vec{E} с поляризационным разделением каналов и различными направлениями излучения для двух каналов в пространстве. В качестве источников излучения используются когерентные источники, при использовании которых отраженные волны остаются линейно поляризованными.

В предлагаемой системе (рис. 2) для обеспечения ортогональности векторов \vec{E} в двух пространственных каналах плоскости поляризации располагаются таким образом, чтобы между двумя лучами обеспечивался прямой угол. Это достигается за счет выбора ориентации лучей по отношению к поверхности Земли. Лучи в двух каналах будут иметь ортогональную поляризацию по отношению друг к другу.



- ПП1 – плоскость поляризации волны 1;
- ПП2 – плоскость поляризации волны 2;
- ПЗ – поверхность Земли

Рис. 2. Система связи NLOS UV с технологией MIMO 2x2 и поляризационным разделением пространственных каналов и ортогональными лучами в пространстве

Плоскость поляризации волн после молекулярного рассеяния, как было указано выше, не изменится. Однако при неправильном выборе углов приема угол между двумя лучами может отличаться от прямого. Поэтому надо, чтобы угол излучения на рассеивающую область был равен углу приема в обеих плоскостях поляризации ПП1 и ПП2, т.е. углы $\angle BOD = \angle BDO$ и, соответственно, $\angle COD = \angle CDO$. В данной системе угол между плоскостями поляризации ПП1 и ПП2 всегда больше 90° и увеличивается при увеличении дальности связи. Плоскости поляризации постепенно прижимаются к поверхности Земли.

В направлении под углом 90° к направлению падающей волны передача информации отсутствует в обеих системах.

При построении систем дальней связи возникает ряд трудностей. Из-за рассеяния света, поглощения в атмосфере особенно при ее загрязнении, явлений преломления (рефракции) при изменении коэффициента преломления плавном или резком, на больших расстояниях (рис. 3) уровень сигнала существенно снижается. Негативные процессы дополняются уменьшением плотности потока мощности из-за расхождения луча на больших расстояниях, дифракции – отклонения света вблизи возможных преград, не идеальности источников по спектру излучения и возникновении дисперсионных явлений.

На распространение лазерного луча оказывает влияние также турбулентность атмосферы – случайные пространственно-временные изменения показателя преломления, вызванные перемещением воздуха, флуктуациями его температуры и плотности. Поэтому световые волны, распространяющиеся в атмосфере, испытывают не только поглощение, но и флуктуации передаваемой мощности. Турбулентность атмосферы приводит к искажениям волнового фронта и, следовательно, к колебаниям и уширению лазерного пучка и перераспределению энергии в его поперечном сечении. При этом иногда возникают замирания сигнала и связь становится неустойчивой. Замирание наиболее сильно проявляется в ясную солнечную погоду, особенно в летние жаркие месяцы, в часы восхода и захода солнца, при сильном ветре.

Из анализа диаграммы направленности рассеянного света (рис. 1) следует, что возможно два варианта построения предлагаемых систем (рис. 3 и рис. 4).

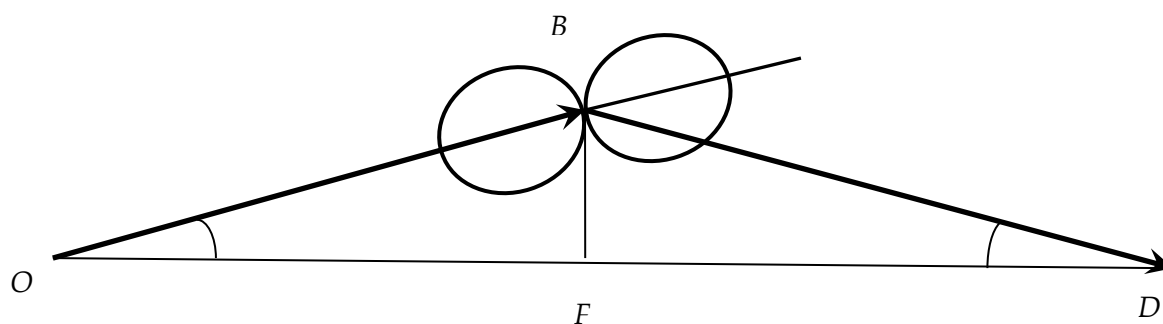


Рис. 3. Система NLOS дальней связи

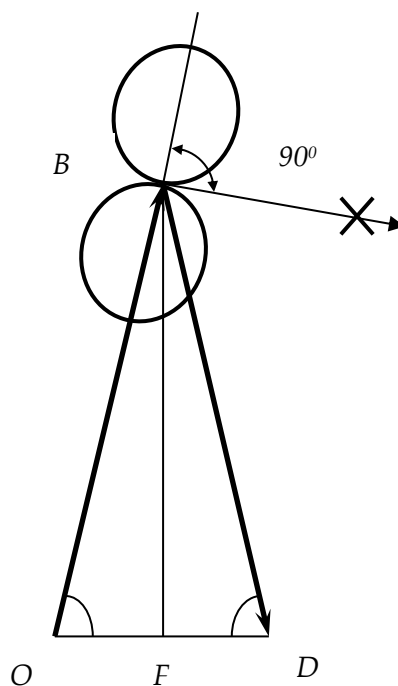


Рис. 4. Система NLOS ближней связи

Для систем NLOS ближней связи (рис. 4), в отличие от систем дальней связи, (рис. 3) влияние турбулентности существенно уменьшается.

Возможность существенного повышения мощности лазеров для преодоления возникающих проблем ограничивается возникновением процессов взаимодействия лазерного излучения с атмосферой, нарушающих законы рассеяния при низких мощностях. Использование законов нелинейной оптики при больших мощностях потребует других решений.

Проанализируем возможности использования дополнительного канала для повышения надежности системы связи за счет резервирования основного канала. Определим вероятность события, состоящего в том, что система, представляющая собой параллельное в смысле надежности соединение двух пространственных каналов, проработает безотказно в интервале времени $(0, t)$.

Система проработает безотказно в интервале времени $(0, t)$ при осуществлении одного из следующих несовместимых событий: A_1 – за время t не откажет ни один канал; A_2 – за время t откажет канал 2, а канал 1 проработает безотказно; A_3 – за время t откажет канал 1, а канал 2 проработает безотказно.

Вероятность безотказной работы системы за время t равна сумме вероятностей событий A_1, A_2, A_3 . Запишем выражение для вероятности безотказной работы системы с двумя каналами

$$P(t) = P_1(t) + P_2(t) - P_1(t)P_2(t),$$

где $P_1(t), P_2(t)$ – вероятность безотказной работы соответственно 1 и 2 каналов. При равенстве $P_1(t) = P_2(t) = P_p(t)$ получим

$$P_c = 2P_p(t) - P_p^2(t).$$

На рис. 5 представленны графики зависимостей увеличения вероятности безотказной работы системы NLOS UV с технологией MIMO 2x2 по отношению к одноканальной системе. Функция $\Delta P(P_2)$ при фиксированном значении вероятности P_1 имеет линейный характер. При увеличении вероятности безотказной работы P_1 первого канала прирост надежности ΔP уменьшается. В пределе при $P_1 = P_2 = 1$ вероятность безотказной работы максимальна и равна 1. Вертикальными стрелками показан прирост ΔP для случаев равенства значений P_1 и P_2 . Максимальный прирост имеет место при $P_1 = P_2 = 0,5$. Для описания работы системы NLOS оптического диапазона UV с технологией MIMO можно воспользоваться известными математическими соотношениями для радио диапазона [10].

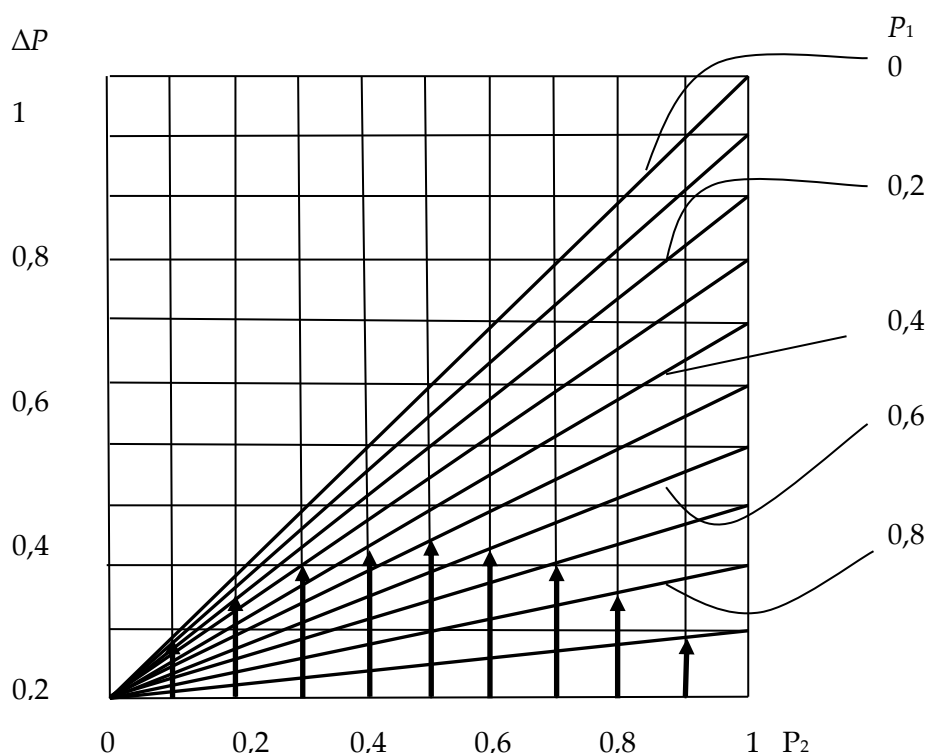


Рис. 5. Увеличение надежности системы NLOS UV с технологией MIMO 2x2 по отношению к одноканальной системе

Матрица-столбец \mathbf{U}_T сигналов передающего устройства из N канальных передатчиков и матрица-столбец \mathbf{U}_R приемного устройства из N канальных приемников имеют вид

$$\mathbf{U}_T = \begin{bmatrix} U_{T1} \\ U_{T2} \\ \vdots \\ U_{TN} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U}_R = \begin{bmatrix} U_{R1} \\ U_{R2} \\ \vdots \\ U_{RN} \end{bmatrix}.$$

Передаточная функция канала описывается матрицей \mathbf{H}

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ h_{M1} & h_{M2} & \dots & h_{MN} \end{bmatrix},$$

где h_{ij} – передаточная функция между i -й передающей и j -й приемной антенной.

Сигналы, принятые антеннами на приемном конце линии связи, связаны с сигналами на передающем конце матричным соотношением

$$\mathbf{U}_R = \mathbf{H} \times \mathbf{U}_T.$$

Определить, какие сигналы были переданы, возможно с помощью решающего устройства, установленного на приемной стороне системы связи. В матричной форме решение имеет вид

$$\mathbf{U}_T = \mathbf{H}^{-1} \times \mathbf{U}_R.$$

Для решения задачи необходимо знать матрицу передачи \mathbf{H} . Значения элементов матрицы \mathbf{H} на практике можно определить, например, посылая известный тестовый сигнал поочередно через каждую из передающих антенн при выключенных остальных и замеряя уровни сигнала на всех приемных антеннах в каждом случае. В случае NLOS с MIMO 2x2 нахождение матрицы \mathbf{H} существенно упрощается. Задача сводится к решению системы из двух уравнений с двумя неизвестными.

II. Использование световодных решеток в передатчиках NLOS UV

Увеличить надежность системы связи можно также за счет повышения мощности оптических излучателей. Однако есть ряд трудностей при реализации этого метода.

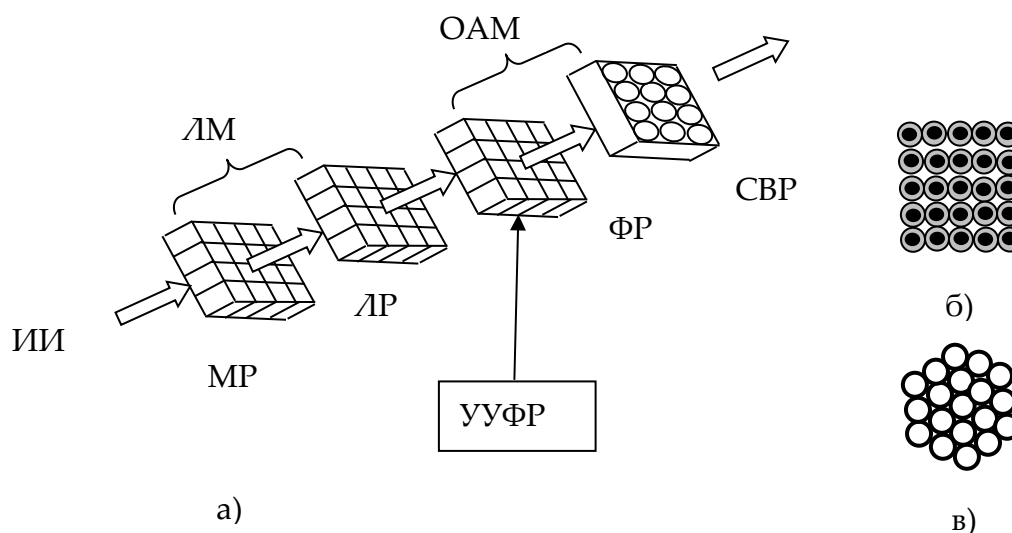
В системах для передачи информации излучение когерентных оптических источников большой мощности, как правило, модулируется внешними модуляторами: электрооптическими, магнитооптическими или акустооптическими. Они ставятся после лазера. При этом возникают сложности в фокусировке луча (формировании заданной диаграммы направленности), увеличиваются потери мощности за счет модулятора, требуются большие амплитуды сигналов для подачи на модулятор, а значит возникают трудности в реализации усилителей с высокими выходными амплитудами сигналов и большой полосой частот для высокоскоростных систем передачи информации.

Другое решение – это использование полупроводниковых лазеров (ППЛ). ППЛ обеспечивают возможность использования непосредственной (внутренней) модуляции путем подачи достаточно малого управляющего тока. Они имеют малые размеры, дешевле, работают при низких напряжениях, требуют для накачки токи всего в

сотни мА. Однако у ППИ есть ряд недостатков: сравнительно малые мощности излучения, достаточно широкая диаграмма направленности излучения.

Другим предложением в данной работе по увеличению надежности системы связи NLOS UV является применение решеток из световодов, которые объединяются с решетками из ППИ с учетом особенностей UV диапазона (рис.6). Это позволит увеличить излучаемую оптическую мощность на передающем конце линии связи за счет интеграции мощностей отдельных маломощных ППИ. Такое решение требует обеспечения синфазности на выходных апертурах отдельных световодов объединенных в решетку. Для этого нужны управляемые фазовращатели.

В настоящее время ведутся работы по созданию фазированных оптических решеток с управляемыми фазовращателями, однако они запитаны от одного лазера [11] и не используют решетку из световодов в отличие от предлагаемого решения.



СВР – световодная решетка; ФР – фазовращательная решетка; МР – модуляторная решетка; УУФР – устройство управления ФР; ЛР – лазерная решетка; ИИ – источник информации; ОАМ – оптический антенный модуль; ЛМ - лазерный модуль

Рис. 6. Система связи NLOS UV с решеткой из световодов и лазеров: а) структурная схема системы; б) решетка оптических световодов с твердотельным сердечником и с неизменной поляризацией UV диапазона для малых мощностей; в) решетка трубчатых оптических световодов с неизменной поляризацией UV диапазона для больших мощностей

В связи с бурным развитием волоконно-оптических систем связи созданы одиночные когерентные источники оптического излучения в интеграции со скоростными модуляторами для реализации различных типов модуляции [12]. Однако такие интегральные модули предназначены для окон прозрачности световодов в инфракрасном диапазоне и не могут использоваться в ультрафиолетовом диапазоне. Если

будут разработаны аналогичные интегральные модули для UV диапазона, то они могут использоваться в предлагаемой системе. Характеристики системы улучшатся. В этом случае в схеме (рис. 6) следует поменять местами решетки МР и ЛР.

Для обеспечения когерентности суммарного излучения ППЛ используется решетка из управляемых фазовращателей. На решетку лазеров подаются модулирующие сигналы с решетки модуляторов. Выходные сигналы модуляторов синхронизированы между собой. С уменьшением заданной пропускной способности системы связи требования к системе синхронизации модуляторов снижаются.

Для компенсации температурной нестабильности параметров ППЛ следует использовать лазеры со встроенными фотодиодами для построения схем автоматической регулировки положения рабочей точки ваттамперной характеристики лазеров. Из-за неприемлемо больших для реализации излучающей апертуры решетки поперечных размеров отдельных ППЛ предлагается подавать световые лучи в оптические волокна, которые объединяются в решетку (рис. 6).

Торец жгута из световодов полируется. Он выполняет роль раскрыва антенной решетки из пучка световодов. На другом конце жгута световоды разводятся в пространстве и подключаются к элементам решетки управляемых фазовращателей. Для обеспечения синфазности излучающих апертур волокон решетки световодов надо выполнять решетку световодов и фазовращателей в виде единой твердотельной конструкции – оптического антенного модуля.

Особенность «темного» UV диапазона, используемого в NLOS – короткие длины волн $\lambda = 250 \div 270$ нм. Соответственно, нужны специальные виды волокон. В этом диапазоне большие потери в кварцевых волокнах, при больших мощностях наблюдается разогревание волокна.

Для небольших мощностей и коротких длин световодов, как в предлагаемой системе, возможно использование специальных оптических волокон UV диапазона (рис.6 б), а для больших мощностей – использование специальных трубчатых световодов [13] (рис. 6 в).

Следует обратить внимание на поляризационные характеристики применяемых световодов. Разработаны световоды, которые не изменяют поляризацию со входа на выход. Так называемые слабонаправленные световоды с малыми значениями $\Delta \leq 0,01$.

Здесь

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1},$$

где n_1 и n_2 – коэффициенты преломления материалов сердечника и оболочки световода.

Для приближенного расчета диаграмм направленности решеток оптических волокон можно воспользоваться теорией нахождения электромагнитных полей в дальней зоне от поверхностных излучателей, если считать, что раскрыв решетки СВР имеет ступенчатое распределение поля близкое к равномерному.

Задача нахождения поля поверхностного излучателя в общем случае достаточно сложна. Найти ее точное решение можно в весьма ограниченном количестве случаев, когда излучающая поверхность имеет форму простейшей геометрической фигуры (плоского прямоугольника, диска, цилиндра).

Воспользуемся приближенным решением для определения внешнего поля поверхностных излучателей со сплошной апертурой [14].

Пусть имеется прямоугольный раскрыв $L_H \times L_E$ в плоскости XY декартовой системы координат XYZ с началом в точке O. Вектор \vec{E} параллелен оси OY.

Для плоскости H, перпендикулярной к вектору поля \vec{E} , и плоскости поперечного сечения торца с заданной функцией распределения поля по раскрытию

$$\dot{E}_H(\theta) = je^{-jmr_0} \frac{1 + \cos \theta}{2\lambda r_0} \iint_S E_{yS} e^{jmx_S \sin \theta} dx dy.$$

Здесь r_0 – расстояние от центра излучающей апертуры до точки наблюдения; E_{yS} – величина составляющей поля параллельной оси OY на поверхности раскрытия с заданной функцией распределения по раскрытию; λ – длина волны; θ – угол между осью OZ (в направлении перпендикулярном к раскрытию) и линией OX; x_S – переменная координаты на плоскости раскрытия; m – волновое число ($m = 2\pi / \lambda$).

Аналогичное соотношение имеет место для плоскости E, где вместо координаты x_S следует использовать координату y_S .

Для постоянного распределения поля по раскрытию функция направленности примет вид

$$F_H(\theta) = (1 + \cos \theta) \frac{\sin\left(\frac{mL_H}{2} \sin \theta\right)}{\frac{mL_H}{2} \sin \theta}.$$

Ширина диаграммы направленности в плоскостях H и E

$$2\theta_{H0,5} \approx 0,88 \frac{\lambda}{L_H}, \quad 2\theta_{E0,5} \approx 0,88 \frac{\lambda}{L_E}.$$

Из анализа результатов проведенного моделирования диаграмм направленности лазерных решеток следует, что в диапазоне UV световодную решетку из-за больших диаметров световодов по отношению к длине волны возможно реализовать при значениях L_h более 500λ (рис. 7).

Следует обратить внимание на то, что кроме излучения в главном направлении под прямым углом к излучающей апертуре имеет место боковое излучение (рис. 7).

Уровень бокового излучения при равномерном возбуждении идеального раскрытия не зависимо от размеров раскрытия составляет -13,2 дБ [14]. Наличие бокового излучения в системе NLOS UV с ортогональным поляризационным мультиплекси-

рованим і технологією MIMO 2x2, а також просторовими каналами, рознесеними на 90° , приводить до появи просторових лучей, не перпендикулярних друг до друга, відповідно, до збільшення елементів h_{12} і h_{21} в матриці \mathbf{H} системи MIMO за рахунок появи паразитної поляризації.

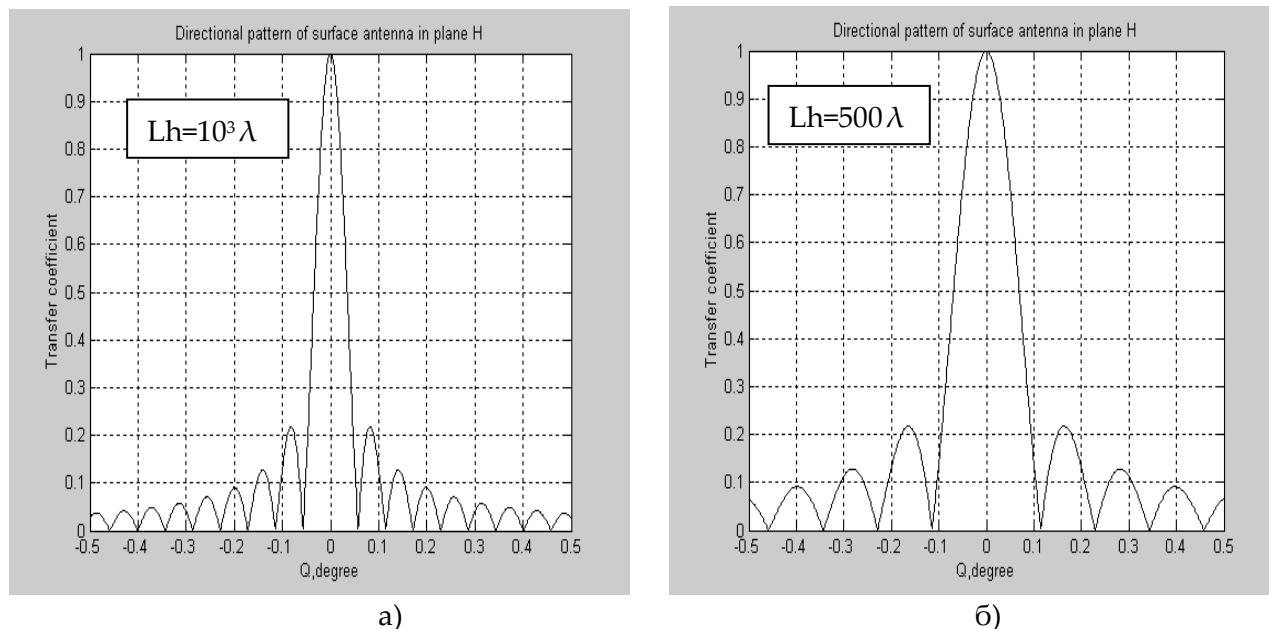


Рис. 7. Діаграми направленності світowodної решетки в площині H для різних розмірів раскрыва (по вертикалі нормований коефіцієнт передачі F_H , по горизонталі угол θ в градусах)

Для зниження впливу бокового випромінювання є декілька рішень. Можна змінити розподіл поля в раскрыві світowodної UV решетки по аналогії з радіодіапазоном [14] на спадаюче до країв, наприклад, по законам, представленим на рис. 8. Зниження рівня бокових випромінювань супроводжується розширенням головного луча.

В оптичному діапазоні змінити розподіл амплітуд в раскрыві можна за рахунок введення затухання в окремих світоводах. Однак таке рішення приведе до втрат випромінюваної потужності.

Друге рішення – перерозподіл потужностей між світоводами по різних законам (рис. 8) без аттенуаторів і без втрати загальної випромінюваної потужності потребує додаткового дослідження для реалізації.

Для ступінчастого розподілу поля в оптичному круглому раскрыві (рис. 6 в) діаграму направленності, по аналогії з радіодіапазоном, можна визначити вираженням

$$F(\theta) = \frac{2J_1(u)}{u} = \Lambda_1(u),$$

де J_1 – функція Бесселя першого порядку; Λ_1 – лямбда функція першого порядку.

Функція $u = mr \sin \theta$, де r – радіус світowodної апертури.

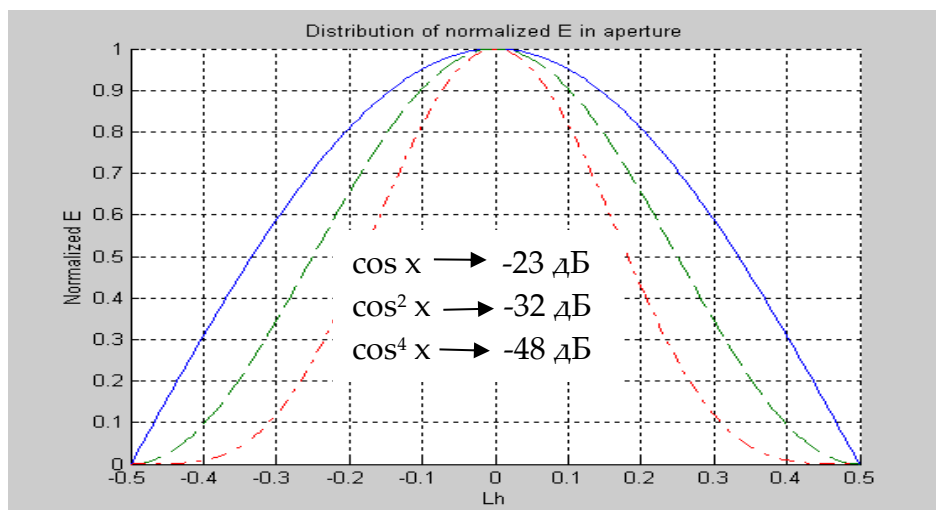


Рис. 8. Распределения нормированного значения поля E в раскрыве светодной решетки и уровни первого бокового лепестка диаграммы направленности (по горизонтали нормированная координата по раскрыву относительно середины раскрыва)

Исследования бокового излучения для круглого оптического раскрыва по предложенной модели дают результаты, аналогичные прямоугольному. Следует обратить внимание на точность описания процессов излучения апертуры светодной решетки в предложенной математической модели. Общая апертура решетки состоит из отдельных апертур световодов. Из этого следует:

- точность модели увеличивается при уменьшении неизлучающих областей (оболочек световодов) между отдельными апертурами;
- функции распределения поля в общем раскрыве являются ступенчатыми. Размер излучающей ступени определяется диаметром отдельной излучающей апертуры. При уменьшении диаметра отдельной апертуры точность возрастает.

Кроме того, точность зависит от распределения поля в апертуре торца световода (одной ступени общего распределения).

Выводы

Для повышения надежности передачи информации систем NLOS UV диапазона предлагается:

- применить в оптическом диапазоне UV технологию MIMO с ортогональным поляризационным мультиплексированием когерентного лазерного излучения от двух источников и пространственными каналами с отражением от разнесенных в пространстве областей молекулярного рассеяния;
- максимальный прирост вероятности безотказной работы системы NLOS UV при введении дополнительного пространственного канала для одинаковых вероятностей безотказной работы каналов, равных 0,5, составляет 25%;
- в передатчиках для увеличения общей излученной мощности и формирования узкой диаграммы направленности использовать решетки из световодов, которые запитаны от маломощных лазерных источников с внутренней модуляцией;

- для уменьшения взаимного влияния пространственных каналов в системе NLOS UV в раскрыве решетки из световодов использовать спадающее к краям раскрыва распределение поля, которое следует обеспечивать за счет перераспределения мощностей между световодами;

- уменьшить уровень бокового излучения в случае квадратного раскрыва в идеальной модели с -13,2 дБ для равномерного распределения по раскрыву до -48 дБ для распределения по раскрыву $\cos^4 x$ плавно спадающего к краям раскрыва.

Список литературы:

1. *Shaw G. A., Nischan M. L., Iyengar M., Kaushik S., Griffin M. K.* NLOS UV communication for distributed sensor systems. Integrated Command Environments. International Society for Optics and Photonics. 2000. Vol. 4126. P. 83-96. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.407519>.

2. *Shaw G.A., Nischan M.L.* Short-range NLOS ultraviolet communication testbed and measurements. Battlespace Digitization and Network-Centric Warfare. International Society for Optics and Photonics. 2001. Vol. 4396. P. 31-40. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.438327>.

3. *Shaw G.A., Siegel A.M., Model J.* Ultraviolet communication links for distributed sensor system. IEEE LEOS NEWSLETTER. 2005. Vol. 19, No.5. P.26-29.

4. *Белов В.В., Гриднев Ю.В., Кудрявцев А.Н., Тарасенков М.В., Федосов А.В.* Оптико-электронная связь в УФ-диапазоне длин волн на рассеянном лазерном излучении. Оптика атмосферы и океана. СО РАН, 2018. Т. 31, №7. С. 559-562.

5. *Склярков Д.Ф.* Моделирование атмосферных трасс для линий оптической связи без прямой видимости для обеспечения геодезических и геологических работ. Труды института лазерной физики. СО РАН, 2006. С. 1-6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-atmosfernyh-trass-dlya-linij-opticheskoy-svyazi-bez-pryamoy-vidimosti-dlya-obespecheniya-geodezicheskikh-i-geologicheskikh>.

6. *Бритвин А.В., Поллер Б.В., Алексеев А.В.* О свойствах обратного рассеяния ультрафиолетовых сигналов для управления подвижными объектами. Труды института лазерной физики. СО РАН, 2008. №2. С. 1-8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-svoystvah-obratnogo-rasseyaniya-ultrafioletovyh-signalov-dlya-upravleniya-podvizhnymi-obektami>.

7. *Refaai A., Abaza M., El-Mahallawy M.S., Aly M.H.* Performance analysis of multiple NLOS UV communication cooperative relays over turbulent channels. Optics express. 2018. Vol. 26, No. 16, P. 19972-19985. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.26.019972>.

8. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. Пер. с англ., 2 изд. М.: Наука, 1973. 720 с.

9. *Шерклифф У.* Поляризованный свет. Пер. с англ. М.: Мир, 1965. 264 с.

10. *Гепко И.А., Олейник В.Ф., Чайка Ю.Д., Бондаренко А.В.* Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития. К.: ЕКМО, 2009. 672 с.

11. *Heck M.J.R.* Highly integrated optical phased arrays: photonic integrated circuits for optical beam shaping and beam steering. Nanophotonics. 2017. Vol. 6, No. 1. P. 93-107. DOI: <https://doi.org/10.1515/nanoph-2015-0152>.

12. *Фокин В.Г.* Когерентные оптические сети. Новосибирск: СибГУТИ, 2015. 370 с.

13. *Мендес А., Морзе Т.Ф.* Справочник по специализированным оптическим волокнам. М.: Техносфера, 2012. 728 с.

14. *Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И.* Антенны и устройства СВЧ. М.: МАИ, 1999. 528 с.