

УДК: 535:628.373.8

UDC: 535:628.373.8

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД ПЕРЕДАЧИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПО АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ

INTERFEROMETRIC METHOD OF LASER RADIATION TRANSMISSION USING FREE SPACE OPTICS

Мышкин Вячеслав Федорович
д.ф.-м.н., доцент
Томский национальный исследовательский политехнический университет, Томск, Россия

Mishkin Viacheslav Fedorovich
Dr.Sci.Phys.-Math., associate professor
National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Хан Валерий Алексеевич
д.т.н.
Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск, Россия

Khan Valery Alekseevich
Dr.Sci.Tech.
Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

Борисов Валентин Александрович

Borisov Valentin Alecsandrovich

Ленский Владимир Николаевич
начальник учебной части военной кафедры

Lensky Vladimir Nikolaevich

Польченко Валерий Сергеевич
аспирант
Томский национальный исследовательский политехнический университет, Томск, Россия

Polchenko Valery Sergeevitch
postgraduate student
National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Кемельбеков Бекен Жасымбаевич
Академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева, Алматы, Казахстан

Kemelbekov Beken Zasimbaevitch
Academy of transport and communications named after M. Tinishpaeva, Almati, Kazakhstan

Проведен анализ различных условий когерентного сложения двух (четырёх) потоков лазерного излучения. Показано, что можно создавать устройства, обеспечивающие непрерывное вычитание волн. В таком потоке излучения непрерывное вычитание на трассе может быть заменено в непрерывное сложение на ФЭУ путем использования дисперсионной линии задержки. Результаты разработки могут быть использованы при создании атмосферных открытых линий связи нового поколения

The analysis of the various conditions of the two (four) laser radiation streams coherent addition was realized. It is shown that it is possible to create devices providing continuous subtraction of waves. In such radiation stream a continuous subtraction on the line can be replaced by the continuous addition on the photomultiplier by using a dispersive delay line. The research results can be used for creation of modern open atmospheric connection lines

Ключевые слова: ЛАЗЕР, АТМОСФЕРНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ СВЯЗИ (АОЛС), СИГНАЛ, ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ, ЛУЧ, ФОТОПРИЕМНИК, ДИСПЕРСИЯ

Keywords: LASER, FREE SPACE OPTICS (FSO), SIGNAL, INTERFERENCE, RAY, PHOTODETECTOR, DISPERSION

Основным требованием к современным системам электросвязи является высокая скорость передачи информации. Оптические системы для передачи по атмосферным открытым линиям связи (АОЛС) характеризуются высокой скоростью передачи и небольшими

капитальными затратами [1 - 3].

Известно, что лазерное излучение при прохождении в любой среде ослабляется. АОЛС также подвержена существенным влияниям метеоусловий. Всепогодные системы передачи информации по АОЛС до сих пор не созданы. Поэтому актуальна разработка методов и приборов для оптической связи, не чувствительные к величине ослабления сигнала на трассе АОЛС [3 - 6].

Известно, что из области интерференционного минимума излучение не рассеивается. После прохождения области пересечения, интенсивности лучей восстанавливаются. Совмещение ослабляющего участка АОЛС с минимумом интерференции позволит передавать сигнал с меньшим ослаблением [7 - 10].

Схема устройства для формирования двух когерентных лучей, сходящихся под малым углом, приведена на рис 1. Используется толстое зеркало с задней отражающей поверхностью. Угол наклона отражающих поверхностей определяет угол между интерферирующими лучами.

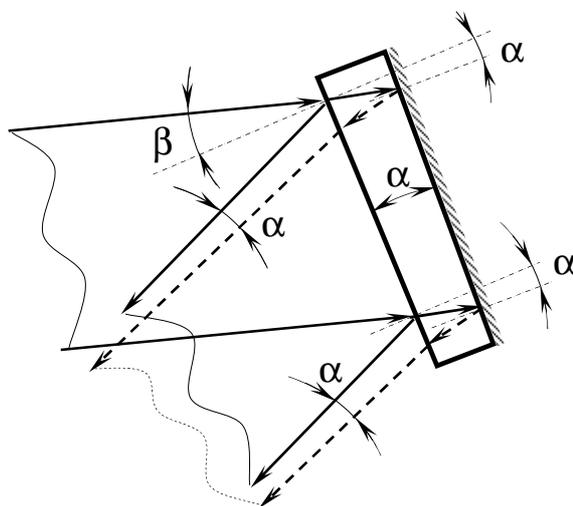


Рис. 1. Схема формирования 2 когерентных лучей на одной длине волны, сходящихся под малым углом. 1 – зеркало, 2 – падающий луч, 3 – отраженные лучи.

Рассмотрим интерференцию двух лучей. На рис. 2 (а) приведена <http://ej.kubagro.ru/2012/08/pdf/57.pdf>

геометрия лучей и картина в различных поперечных сечениях (б). Интерференционная картина представляет собой периодическую модуляцию интенсивности в направлении, перпендикулярном длинной диагонали виртуального ромба, образованного сходящимися пучками излучения (рис. 2, а). Лишь в одной плоскости происходит полное наложение пучков. При малой пространственной когерентности интерферирующих лучей векторное сложение возможно лишь при значительном наложении лучей.

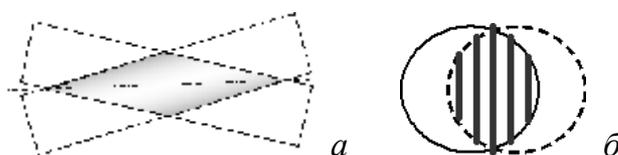


Рис. 2. Геометрия пересечения лазерных лучей при интерференции

Период интерференции двух сходящихся под углом α лучей равен

$$T = l (2 \sin 0,5\alpha)^{-1}. \quad (1)$$

При уменьшении угла схождения период интерференции может превышать величину короткой диагонали указанного ромба. При этом в некоторой части трассы интерферирующие лучи не взаимодействуют со средой передачи (пространственная область минимума интерференции).

Выражение для полудлины длинной диагонали l области пересечения

$$l = D (\sin \alpha)^{-1}, \quad (2)$$

где D – диаметр интерферирующих пучков, α - угол схождения лучей.

С учетом выражения (1), при условии $D = T$, получаем наибольшую длину области перекрытия апертур взаимодействующих лазерных пучков $2l$

$$2l = l (2 \sin \alpha \sin 0,5\alpha) \approx l \alpha^{-2}. \quad (3)$$

Сразу за зеркальными плоскостями лучи начинают расходиться. При такой схеме формирования лазерного луча до некоторого расстояния вдоль лучей наблюдается интерференционный минимум. Поэтому потери

излучения на ослабляющей трассе не происходит. В дальнейшем наблюдаются два слабонерасходящихся пучка полной мощности.

Обзор различных схем формирования интерференционной картины показывает, что интерферирующие лучи могут быть соосны или ориентированы под малым углом. В первом случае можно использовать интерферометр Майкельсона или плоскопараллельную пластину. Во втором случае светоделительная пластина должна иметь некоторый угол между отражающими поверхностями. В зависимости от разности хода лучей в суммарном пучке интерферометра Майкельсона лучи могут складываться или вычитаться.

На рис. 3 приведена схема экспериментальных исследований, в которых изучали закономерностей взаимодействия различных преград с двумя потоками излучений, испытывающих вычитание амплитуд при сдвиге их фаз на полуволну. С помощью двух линз лазерное излучение формируется в пучок диаметром 50 мм. Для формирования двух когерентных пучков, распространяющихся под малым углом, используется стеклянная пластинка толщиной 5 мм, между поверхностями которой имеется небольшой угол.

Использовались следующие расстояния: лазер - телескоп 3 м, расстояние телескоп - точка фокусировки – 12,5 м, телескоп – делительная пластина 1,1 м. На расстоянии 0,9 м от делительной пластины из пучка с помощью квадратной диафрагмы вырезалась центральная часть (сечение А-А). В этом же сечении устанавливались различные экраны для ослабления пучка.

Сразу за стеклянной пластинкой лучи начинают расходиться. При такой схеме формирования интерференционной картины до некоторого расстояния вдоль лучей наблюдается интерференционный минимум. В дальнейшем наблюдаются два слабонерасходящихся пучка полной мощности. Однако, из-за малости угла между пучками расстояние, при

котором пучки пространственно расходятся, превышают несколько сот метров. Поэтому с помощью формирующих линз когерентные пучки фокусировали на расстоянии 10-15 метров от светоделителя в пятно диаметром около двух миллиметров.

В используемой схеме, за счет задержки по фазе в стекле, луч, формируемый от задней стенки светоделительной пластины, фокусируется на значительно меньшем расстоянии от пластины, чем луч, отраженный от передней плоскости. В точках их фокусировки можно выделять по отдельности практически весь пучок или преобразовать его в фотосигнал. При этом вклад второго луча в плоскости фокусировки первого луча в формируемый фотосигнал незначителен из-за его распределения по значительной площади.

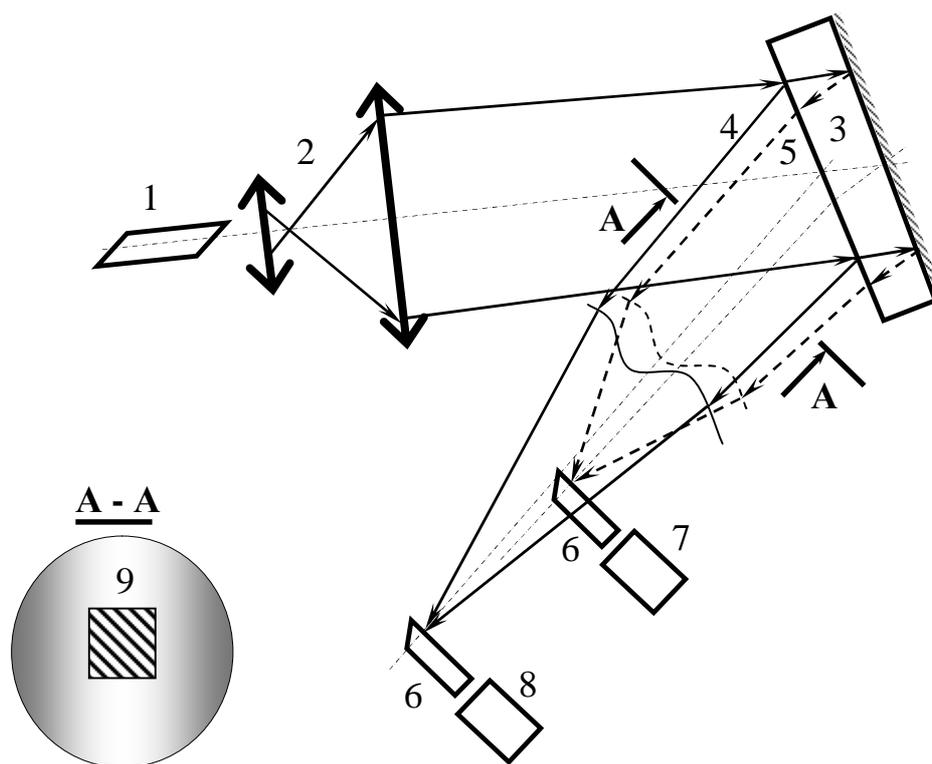


Рис. 3. Схема изучения интерференционных явлений.

1 – лазер, 2 – коллиматор, 3 – плоскопараллельная пластина, 4, 5 – отраженные от пластины лучи, 6 – световоды, 7, 8 – фотоприемники, 9 – возмущающий предмет.



Рис. 4.
Интерференционная
картина в
сечении А-А

На рис. 4 приведена фотография экрана, вносимого в область интерференции. В центральной области можно сформировать как минимум, так и максимум интерференции за счет юстировки светоделительной пластины.

В область минимума интерференционной картины вносили различные непрозрачные экраны прямоугольной формы, имеющей размеры, сравнимые с периодом интерференционной картины. Область интерференции перекрывали с помощью закрепленного сверху маятника, на нижнем конце которого размещали ослабляющие экраны. Для увеличения чувствительности измерений лазерный пучок, в плоскости ослабляющих экранов, пропускали через прямоугольную диафрагму сечением $1,6 \text{ см}^2$. При этом сигнал фотодиода ФД-256 регистрировали в одном из интерферирующих пучков с помощью электронного осциллографа Tektronix TDS2024B. Результаты приведены на рис. 5.

Из сравнительного анализа осциллограмм следует, что при превышении размера экрана размера центрального минимума, имеющего форму овала, зависимость ослабления лазерного излучения зависит от площади экрана. Если площадь экрана меньше, чем площадь области минимума интерференции, то на осциллограмме наблюдается импульс с двумя вершинами. При этом ослабление незначительно и практически не зависит от площади экрана.

Из рис. 5 видно, что при прохождении непрозрачного экрана через область интерференционного минимума ослабления не происходит (периферийные области пика). Провал интенсивности в середине пика обусловлен нахождением там интерференционного максимума.

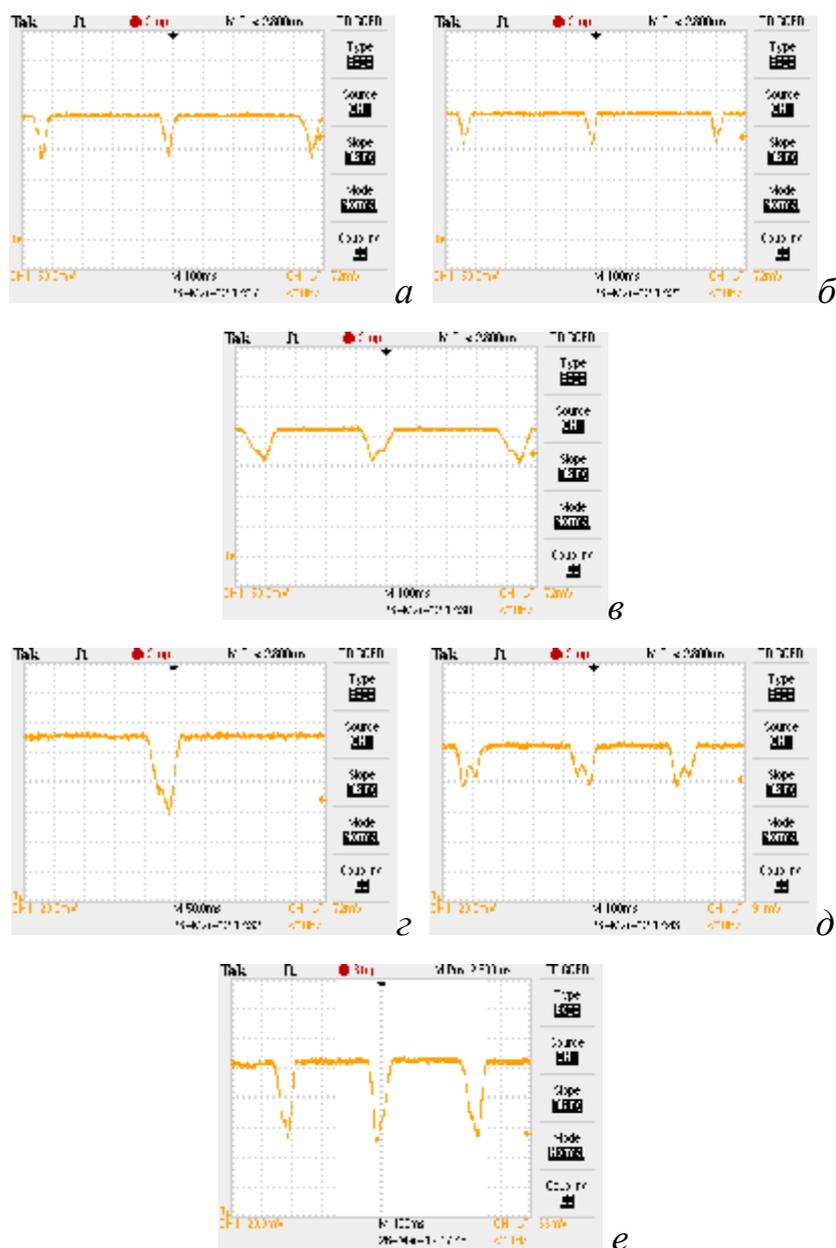


Рис. 5. Осциллограммы, регистрируемые в фокальном пятне, при внесении в интерференционное поле прямоугольных экранов (в мм²): а - 44 (в виде перекрестия), б - 27, в - 23, г - 23, д - 14, е - 27 (полупрозрачный)

Чередование вершин импульсов с меньшей и большей значениями амплитуд на переднем или заднем фронтах, в последовательности электрических импульсов фотодиода на рис. 5 (в, г, д, е), обусловлено асимметрией интенсивности в изучаемом пучке с интерферирующими лучами.

При использовании светоделительной пластины без напыления формируются два когерентных пучка разных интенсивностей. Так как для оптического стекла ($n = 1,46$) отражение от передней поверхности $0,04$, а от задней поверхности $0,96 \times 0,04 \times 0,96 = 0,037$. Для увеличения и выравнивания интенсивностей интерферирующих пучков необходимо повышать отражение от поверхностей, например, путем напыления отражающего слоя. За счет нанесения отражающего покрытия на обе поверхности пластины можно добиться полного использования лазерного излучения в интерферирующих пучках.

Для передачи по ослабляющим трассам можно использовать несколько схем, например, приведенных на рис. 6.

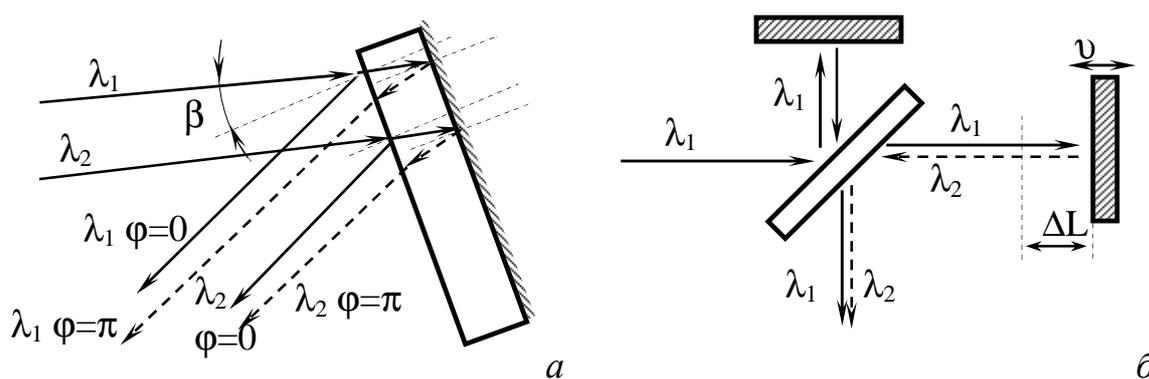


Рис. 6. Схема формирования 4 когерентных лучей на 2 длинах волн.

Где: 1 – зеркало, 2 – падающий луч, 3 – отраженные лучи.

В схеме с интерферометром Майкельсона (рис. 6, б) за счет подвижного зеркала происходит смещение частоты лазерного излучения. При этом изменение положения зеркала приводит к дополнительному смещению фазы волны отраженной от подвижного зеркала. Расчеты показывают, что путем синхронизации фазы исходной волны с пространственным положением подвижного зеркала можно поддерживать суммарную интенсивность выходного пучка на заданном (низком или высоком) уровне.

На фотоприемнике, за счет дисперсионной пластины, можно изменить условия взаимодействия потоков на разных длинах волн. Для перевода интерференции из противофазы (минимум) в одинаковой фазе (максимум) необходимо (достаточно), чтобы разность хода волн в оптической линии задержки составляла половину длины волны (для 1,06 мкм – 0,53 мкм). Материальная дисперсия (зависимость показателя преломления от частоты) для кварца приводит к сдвигу волн в одномодовом оптическом волокне на (0,1-0,3) нс/км. Разность хода составляет $0,53 \cdot 10^{-6} : 3 \cdot 10^8 = 0,26 \cdot 10^{-14}$ с. Необходимая толщина кварцевого стекла составляет $0,26 \cdot 10^{-14} : 0,1 \cdot 10^{-9} = 2,6 \cdot 10^{-5}$ км = 2,6 см. Сложность формирования заданного уровня мощности на трассе является необходимостью непрерывного поддержания заданных условий интерференции - синхронизация с высоким временным разрешением. Такое устройство является достаточно громоздким.

Компьютерное моделирование показывает, что путем синхронизации фазы луча (на светоделительной пластине), отражающегося от неподвижного зеркала и положения подвижного зеркала (при различных значениях разности длин плеч интерферометра Майкельсона) можно поддерживать заданную разность хода лучей. При этом суммарный луч может иметь как минимум, так и максимум интенсивности. Лучи, находящиеся в минимуме при интерференции могут быть использованы для передачи по ослабляющим трассам.

При произвольном соотношении фаз интерферирующих лучей может быть использовано устройство, схема которого приведена на рис. 6, а. Используется плоскопараллельная светоделительная пластина. Если отраженные от передней и задней граней пластины волны находятся в противофазе (с учетом материальной дисперсии), то получаем малую амплитуду по всей трассе (векторное вычитание интенсивностей на обеих длинах волн).

С помощью плоскопараллельной светоделительной пластины, которая сдвигает излучения на полуволну, из двух потоков с разными длинами волн с произвольным соотношением фаз можно сформировать на входе в АОЛС четыре лазерных луча, имеющих фазы

$$[\lambda_1(\varphi_1) + \lambda_2(\varphi_2)] + [\lambda_1(\varphi_1 + \pi) + \lambda_2(\varphi_2 + \approx\pi)]. \quad (4)$$

При использовании импульса излучения на четырех длинах волн с сдвигом частоты (первая пара из которых имеют нулевые начальные фазы, а другая - $\approx\pi$), можно получить два сигнала биений на одинаковых разностных частотах. При этом взаимодействие сигналов биений со сдвигом на полуволну формирует общий сигнал с малой амплитудой.

Такое соотношение фаз обеспечивает близкую к “нулевой” суммарную интенсивность на атмосферной трассе за счет векторного сложения интенсивностей всех четырех волн. Ослабление такого луча незначительно, что следует из закона Бугера.

Если на выходе АОЛС перед фотоприемником использовать дисперсионную линию, обеспечивающую сдвиг в полуволну между входной и выходной компонентами с длинами волн λ_1 и λ_2

$$[\lambda_1(\varphi'_1) + \lambda_2(\varphi'_2)] + [\lambda_1(\varphi'_1 + 2\pi) + \lambda_2(\varphi'_2 + \approx 2\pi)], \quad (5)$$

то волны складываются и энергия излучения проявляется в полной мере.

На выходе из дисперсионной линии, формирующей дополнительный сдвиг фаз равный, π между λ_1 и λ_3 (а также λ_2 и λ_4) формируется суммарный поток излучения, содержащий компоненты с фазами, обеспечивающий условия сложения интенсивностей. Такой сигнал также может быть достаточным для регистрации фотоприемником.

Поток излучения, с необходимым соотношением фаз, удовлетворяющем условию (4), может быть получено с помощью интерферометра Майкельсона с подвижным зеркалом и плоскопараллельной светоделительной пластины.

Проводилось моделирование с помощью компьютера динамики интенсивности потока, содержащего несколько компонентов с заданными длинами волн и фазами. Показано, что существуют соотношения фаз потоков излучения заданных длин волн, для которых возможно подобрать условия непрерывного векторного вычитания или сложения интенсивностей.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (Госконтракт № 14.740.11.0899 и Соглашение № 8510).

ВЫВОД. Показано, что можно создавать устройства, обеспечивающие непрерывное вычитание волн на атмосферной трассе открытых линий связи. Путем использования дисперсионной линии задержки становится возможным преобразование оптического импульса малой интенсивности на выходе из АОЛС в электрический сигнал большой амплитуды.

Список использованной литературы

1. Клоков А.В. Беспроводная оптическая связь - Мифы и реальность // Технология и средства связи, 2000.. №6. с. 12-13.
2. Павлов Н.М., Устинов С.А. Прошлое, настоящее и будущее атмосферных оптических линий передачи // Вестник связи.-2002.- № 2.- С.56 – 59.
3. Николаев А.Ю. Расчет надежности работы атмосферной оптической линии связи. Инфомост // Средства связи, 2001, 4(17). с. 26-27.
4. Медвед Д.Б. Влияние погодных условий на беспроводную оптическую связь // Вестник связи, 2001, №4, с. 154-157.
5. Милютин Е.Р. Расчет параметров атмосферного канала оптических линий связи // Вестник связи. – 2004. № 2. – С. 20 – 23.
6. Клоков А.В. Беспроводная оптическая связь - Мифы и реальность // Технология и средства связи, 2000.. №6. с. 12-13.
7. Мышкин В.Ф., Моторин А.Н. Передача лазерного излучения через поглощающие слои, совмещаемые с минимумом интерференции, Известия ТПУ. 2004. №7. С.45-48.
8. Хан В.А., Мышкин В.Ф., Ленский В.Н., Борисов В.А., Кемельбеков Б.Ж. Передача оптического излучения через атмосферные трассы, Электросвязь. -

2010. - №8. - С.39-42.
9. Мышкин В. Ф., Власов В. А., Хан В. А., Ленский В. Н. Передача многоволнового лазерного излучения в исследуемый объем через плотные аэрозольные слои, *Прикладная механика и техническая физика*, 2011, № 4, т. 52, с. 21-26.
 10. V.F. Myshkin, V.A. Vlasov, V.A. Khan, V.N. Lenskii. Transmission of multiwave laser radiation to the investigated volume through dense aerosol layers. *J. of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2011, v. 52, N 4, p. 517-521.