



(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 214 058** ⁽¹³⁾ **C2**

(51) МПК⁷ **H 04 B 10/10**

РОССИЙСКОЕ АГЕНТСТВО
ПО ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

(21), (22) Заявка: 2001110963/09, 25.04.2001

(24) Дата начала действия патента: 25.04.2001

(43) Дата публикации заявки: 27.03.2003

(46) Дата публикации: 10.10.2003

(56) Ссылки: Оптическая связь. Под ред. ТЕУМИНА И.И. - М.: Радио и связь, 1984, с.107-136.
US 5357362 A, 18.10.1994. WO 91/15071 A1, 03.10.1991. RU 2138134 C1, 20.09.1999.

(98) Адрес для переписки:
119526, Москва, пр-т Вернадского, 101,
корп.1, ИПМ РАН, Патентный отдел

(71) Заявитель:
Общество с ограниченной ответственностью
"Подсолнечник технологии"

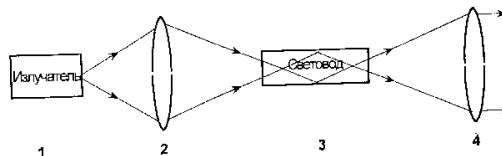
(72) Изобретатель: Васильев В.П.,
Васильев М.В., Лещев А.А., Рагульский
В.В., Сидорович В.Г.

(73) Патентообладатель:
Общество с ограниченной ответственностью
"Подсолнечник технологии"

(54) СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ СИСТЕМ ОТКРЫТОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

(57)
Изобретение относится к системам оптической связи и может использоваться для двухсторонней передачи информации. Технический результат заключается в уменьшении контраста спекл-структуры формируемого светового поля. Для этого пропускают модулированное некогерентное световое излучение через световод и последующую его концентрацию с помощью оптической антенны, при этом световое излучение формируют с шириной частотного спектра $\Delta\nu$ и шириной

углового спектра $\Delta\theta$, превышающей дифракционный угол, соответствующий диаметру световода, излучение модулируют сигналом с полосой частот $\delta\nu$ и преобразуют его в несколько мод световода с максимальной разностью скоростей между ними. 3 з.п. ф-лы, 1 ил.



RU 2 214 058 C 2

RU 2 214 058 C 2



(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 214 058** ⁽¹³⁾ **C2**

(51) Int. Cl.⁷ **H 04 B 10/10**

RUSSIAN AGENCY
FOR PATENTS AND TRADEMARKS

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21), (22) Application: 2001110963/09, 25.04.2001

(24) Effective date for property rights: 25.04.2001

(43) Application published: 27.03.2003

(46) Date of publication: 10.10.2003

(98) Mail address:
119526, Moskva, pr-t Vernadskogo, 101,
korp.1, IPM RAN, Patentnyj otdel

(71) Applicant:
Obshchestvo s ogranichennoj
otvetstvennost'ju "Podsolnechnik tekhnologii"

(72) Inventor: Vasil'ev V.P.,
Vasil'ev M.V., Leshchev A.A., Ragul'skij
V.V., Sidorovich V.G.

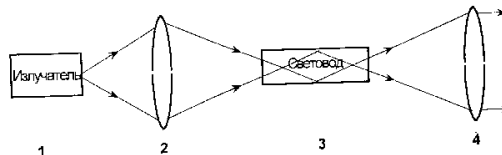
(73) Proprietor:
Obshchestvo s ogranichennoj
otvetstvennost'ju "Podsolnechnik tekhnologii"

(54) **METHOD FOR GENERATING LIGHT BEAMS FOR OPEN OPTICAL COMMUNICATION SYSTEMS**

(57) Abstract:

FIELD: optical communication systems; two-way data transmission. SUBSTANCE: modulated non-monochromatic light beam is passed through optical fiber followed by its concentration with aid of optical antenna; in the process light beam is shaped with frequency spectrum width ΔV and angular spectrum width $\Delta\theta$ exceeding diffraction angle corresponding to optical fiber diameter; beam is modulated by signal with

frequency band δV and converted into several optical-fiber modes at maximal difference in speeds between them. EFFECT: reduced speckle-structure of light field generated. 4 cl, 1 dwg, 3 ex



RU 2 214 058 C2

RU 2 214 058 C2

Изобретение относится к системам открытой оптической связи и может быть использовано для двусторонней передачи информации между удаленными друг от друга объектами без использования проводов и/или оптических волокон для соединения этих объектов, в том числе при большом числе объектов, участвующих в обмене информацией, например, при организации обмена по схеме "точка-мультиточка", то есть при двустороннем обмене информацией между базовой станцией (передающим терминалом) и несколькими абонентами.

Во многих случаях открытой оптической связи световое излучение от передающего терминала к абоненту распространяется по следующей трассе: излучатель (как правило лазер с модулятором), световод, оптическая антенна, концентрирующая излучение (телескоп или иной оптический коллектор), открытое пространство, приемная оптическая система, световод, фотодетектор.

При прочих равных условиях, величина потеря энергии светового излучения на указанной выше трассе зависит от геометрии (длина, диаметр и т.д.) и типа используемых световодов.

Если использовать световоды относительно большого диаметра (многомодовые световоды), то в результате распространения по световоду световое поле в общем случае становится неоднородным по пространству, т.е. в нем появляются локальные максимумы и минимумы интенсивности (так называемая спекл-структура), сильно различающиеся по своей величине, т.е. формируется излучение с высоким контрастом пространственных неоднородностей интенсивности света. Эти неоднородности не исчезают при прохождении света через коллектор, и световой пучок остается пространственно неоднородным на всей трассе его распространения. В том числе, он неоднороден в плоскости приемной апертуры удаленного абонента, которому предназначен сигнал, передаваемый с помощью этого пучка.

Если приемная апертура попадает в локальный минимум интенсивности света, то связь ухудшается и даже может вообще прекратиться из-за недостаточной мощности оптического сигнала, попадающего в приемную апертуру.

В принципе, этот эффект можно скомпенсировать многократным повышением мощности оптического излучения передатчика, что является непрактичным по техническим соображениям и по соображениям стоимости системы.

Другой путь исключить влияние неоднородностей интенсивности света - увеличение размера приемной апертуры до величины, существенно превышающей характерный поперечный размер неоднородностей светового поля. В этом случае приемная апертура захватывает излучение нескольких пятен спекл-структуры и фотодетектор реагирует на их среднюю (по поперечному сечению апертуры) интенсивность. Однако, при увеличении расстояния до абонента характерный размер пятен спекл-структуры увеличивается, что требует соответствующего увеличения диаметра приемной апертуры, а это далеко

не всегда практично.

От указанного недостатка свободны системы, в которых несущее сигнал оптическое излучение подводят к коллектору с помощью тонких (одномодовых) световодов. Как известно, прошедшее через них излучение не содержит локальных минимумов. Соответственно, этих минимумов нет и в плоскости приемной апертуры абонента (по крайней мере, при достаточно высоком оптическом качестве трассы распространения). В настоящее время системы такого типа широко используются в связи (см., например, статьи: P.F. Szajowski at al. Proceed. SPIE, 2001, v.4214, P.1 [1]; G. Nykolak at al. Proceed. SPIE, 2001, v.4214, p. 11 [2]; D.M. Britz at al. Proceed. SPIE, 2001, v.4214, p.63 [3]; J.P. Dodley at al. Proceed. SPIE, 2001, v.4214, p.72 [4]).

Недостатком использования передающей системы с одномодовым световодом является то, что из-за малого диаметра световода трудно достичь высокой эффективности ввода в него светового излучения, источником которого обычно является полупроводниковый лазер. Так, коммерчески доступные устройства, состоящие из полупроводникового лазера и одномодового световода ("pigtailed" лазеры), характеризуются эффективностью ввода излучения не выше 25-30%. Иными словами, на стыке лазера с таким световодом свет, фактически, ослабляется в 3-4 раза, что приводит к уменьшению дальности и надежности связи.

Другим недостатком использования одномодового световода является то, что сформированный с его помощью пучок менее устойчив по отношению к оптическим неоднородностям трассы, располагающимся вблизи от выходной апертуры коллектора. Эксперименты авторов данного изобретения показали, что появление, например, дождевых капель на поверхностях оконных стекол, отделяющих передающую систему от атмосферы, приводит к возникновению крупномасштабных неоднородностей поперечного распределения интенсивности света, которые более контрастны при использовании одномодового световода, чем многомодового. Отрицательное влияние подобных неоднородностей интенсивности на качество связи уже обсуждалось выше.

Кроме того, технология изготовления pigtailed лазера с одномодовым световодом весьма сложна и поэтому стоимость такого устройства многократно превышает стоимость отдельно взятых лазера и световода, пригодных для использования в системах открытой оптической связи.

Применение световода большого диаметра (многомодового) резко повышает эффективность ввода в него излучения и значительно снижает стоимость pigtailed лазера. Однако, при этом на выходе световода возникают упомянутые выше мелкомасштабные неоднородности интенсивности света. С ними, в принципе, можно бороться путем декогерентизации излучения [1-7], которая проявляется в уменьшении контраста интерференционных структур светового поля (в том числе спекл-структур).

Необходимым условием декогерентизации

является некогерентность излучения. Источники некогерентного излучения могут иметь разное конструктивное исполнение. Например в заявке ЕПВ 112076, Н 01 S 03/23, 1984 [5] предложен некогерентный источник излучения, состоящий из нескольких лазеров, которые излучают на разных частотах. Однако некогерентность излучения, являясь необходимым условием, достаточным условием декогерентизации излучения не является. Достаточным условием является наличие разности хода между пространственными составляющими излучения (плоскими волнами в свободном пространстве, или модами в любой волноводной структуре, по которой излучение распространяется), превышающей длину когерентности этого излучения, которая, как известно, обратно пропорциональна ширине его частотного спектра.

Известен способ формирования светового пучка, используемый в системах открытой оптической связи (см. описание к патенту США 5786923, 359/172, 1996 [6]). Известный способ включает модуляцию оптического излучения информационным сигналом и последующую его концентрацию на приемной апертуре абонента с помощью оптической антенны. Недостатком известного способа является то, что для его реализации требуется сложная и громоздкая конструкция, т.к. световой поток от модулятора направляется к оптической антенне с помощью системы зеркал, расщепителя и дефлектора, что, в свою очередь, требует дополнительных средств юстировки (для зеркал), либо электронных средств управления (для дефлекторов).

Наиболее близким к заявляемому по своей технической сущности и достигаемому результату является способ формирования световых пучков для систем открытой оптической связи, известный из описания к заявке РСТ 00/04653, Н 04 В 10/00 [7]. Известный способ предусматривает пропускание модулированного светового излучения через световод и последующую его концентрацию с помощью оптической антенны.

Известному способу присущи недостатки, о которых упоминалось выше. Если в нем использовать одномодовый световод, то не удастся простыми средствами ввести в него все излучение от источника света ввиду малости диаметра световода, что влечет за собой потери излучения и требует неоправданного увеличения мощности источника. Если же в известном способе использовать многомодовый световод, то при прохождении по нему светового пучка происходит возбуждение и интерференция световодных мод, что приводит к образованию спекл-структуры светового поля (см, например, заявку ЕПВ 112076, Н 01 S 03/23, 1984 [5]).

Вместе с тем, использование световодов при формировании световых пучков для передачи информации в системах открытой оптической связи с размещением световодов между излучателем и оптической антенной существенно упрощает конструкцию системы связи.

Поэтому представляется целесообразным, с одной стороны, сохранить наличие

световодов в системах формирования пучков для открытой оптической связи. С другой стороны, необходимо минимизировать потери и контраст пространственных неоднородностей излучения, обусловленных присутствием световода на пути между излучателем и оптической антенной, и тем самым достичь повышения дальности и надежности связи.

Заявляемый в качестве изобретения способ формирования световых пучков направлен на уменьшение контраста спекл-структуры формируемого светового поля, снижение энергопотерь в системах открытой оптической связи, уменьшение стоимости таких систем, повышение дальности и надежности связи.

Указанный результат достигается тем, что способ формирования световых пучков для систем открытой оптической связи включает пропускание модулированного светового излучения через световод и последующую его концентрацию с помощью оптической антенны, при этом световое излучение формируют с шириной частотного спектра $\Delta\nu$ и шириной углового спектра $\Delta\theta$, превышающей дифракционный угол, соответствующий диаметру световода (этот угол равен λ/d , где λ - длина волны излучения, d - диаметр световода), излучение модулируют сигналом с полосой частот $\delta\nu$ и преобразуют его в несколько мод световода с максимальной разностью скоростей между ними ΔV , причем параметры излучения и световода выбирают исходя из условий:

$$L\Delta\nu > \frac{V^2}{\Delta V} \text{ и } L\Delta\theta < \frac{V^2}{\Delta V},$$

где L - длина световода, м;

$\Delta\nu$ - ширина частотного спектра формируемого светового излучения, c^{-1} ;

$\delta\nu$ - полоса частот модулирующего сигнала, c^{-1} ;

V - средняя скорость распространения мод по световоду, м/с;

ΔV - максимальная разность между скоростями распространения различных мод, возбуждаемых излучением в световоде, м/с, зависящая от распределения показателя преломления материала световода по поперечному сечению этого световода и от ширины углового спектра $\Delta\theta$;

$\Delta\theta$ - ширина углового спектра светового излучения, направляемого на входной торец световода.

Указанный результат достигается также тем, что частотный спектр светового излучения формируют из спектральных линий, минимальное расстояние между которыми превышает $\delta\nu$.

Указанный результат достигается также тем, что световое излучение формируют с числом спектральных линий N и шириной углового спектра $\Delta\theta$, обеспечивающей возбуждение A мод световода, причем N и A выбирают исходя из условия:

$$\frac{A+N-1}{A \cdot N} \leq C^2,$$

где N - число спектральных линий; A - число мод, возбуждаемых в световоде каждой спектральной линией; C - заданный предельный контраст спекл-структуры светового поля на выходе световода

(контраст спекл-структуры - это отношение стандартной девиации интенсивности светового поля к среднему значению этой интенсивности в некотором сечении светового поля, см. Дж. Гудман. Статистическая оптика. "МИР", М., 1988 [8]).

Указанный результат достигается также тем, что параметры излучения и световода выбирают исходя из условия

$$L\Delta\nu > (N-1)\frac{v^2}{\Delta v}.$$

Отличительными признаками заявляемого изобретения являются:

- формирование светового излучения с шириной частотного спектра $\Delta\nu$ и шириной углового спектра $\Delta\theta$, превышающей дифракционный угол, соответствующий диаметру световода;

- модулирование излучения сигналом, занимающим полосу частот $\delta\nu$;

- преобразование его с помощью световода в несколько угловых мод с максимальной разностью скоростей между ними ΔV ;

- выбор параметров излучения и световода из условий:

$$L\delta\nu > \frac{v^2}{\Delta v} \text{ и } L\delta\nu < \frac{v^2}{\Delta v},$$

где L - длина световода, м;

$\Delta\nu$ - ширина частотного спектра формируемого светового излучения, с⁻¹;

$\delta\nu$ - полоса частот модулирующего сигнала, с⁻¹;

V - средняя скорость распространения мод по световоду, м/с;

ΔV - максимальная разность между скоростями распространения различных мод, возбуждаемых излучением в световоде, м/с, зависящая от распределения показателя преломления материала по поперечному сечению этого световода и от ширины углового спектра $\Delta\theta$;

$\Delta\theta$ - ширина углового спектра светового излучения, направляемого на входной торец световода;

- формирование частотного спектра светового излучения из спектральных линий, минимальное расстояние между которыми превышает $\delta\nu$;

- формирование светового излучения с числом спектральных линий N и шириной углового спектра $\Delta\theta$, обеспечивающей возбуждение A мод световода, причем N и A выбирают исходя из условия

$$\frac{A+N-1}{A \cdot N} \leq C^2,$$

где N - число спектральных линий; A - число мод, возбуждаемых в световоде каждой спектральной линией; C - заданный контраст спекл-структуры светового поля на выходе световода;

- выбор параметров излучения и световода исходя из условия

$$L\Delta\nu > (N-1)\frac{v^2}{\Delta v}.$$

Если использовать указанные выше правила выбора параметров излучения и параметров световода, то контраст спекл-структуры светового поля не превышает C, что повышает эффективность системы открытой оптической связи.

Для того чтобы пояснить причины эффективного сглаживания спекл-структуры, обеспечиваемого использованием данного изобретения, сначала рассмотрим механизм возникновения этой структуры. При попадании излучения в многомодовый световод в нем возбуждается большое число поперечных мод, распространяющихся с разными скоростями. Интерференция этих мод и приводит к возникновению спекл-структуры поля. Из-за различия скоростей мод картина спекл-структуры поля является различной в различных сечениях световода, поскольку от одного сечения световода до другого меняются коэффициенты разложения поля по модам. При монохроматическом световом излучении картина интерференции мод световода (спекл-структура светового поля) в любом сечении стационарна (если не происходит изменений формы и других параметров световода во времени, см., например, заявку РСТ 89/08954, Н 04 В 9/00 [9]), а величина контраста спекл-структуры максимальна.

Рассмотрим теперь случай немонохроматического излучения. Предположим, что входящее в многомодовый световод излучение имеет две спектральные составляющие. В этом случае, вследствие одинаковости поперечной структуры излучения этих составляющих на входном торце световода осуществляется одинаковое распределение излучения каждой из них по поперечным модам световода, то есть коэффициенты разложения поля по поперечным модам на входе световода идентичны для обеих спектральных составляющих [10]. Заметим, что скорости распространения мод зависят не только от индекса (номера) моды, но и от длины волны излучения. Благодаря этому коэффициенты разложения поля по модам при переходе от одного сечения световода к другому изменяются для различных спектральных составляющих неодинаково.

В результате, поперечные распределения излучения двух спектральных составляющих поля, совпадающие в каком-либо сечении световода (например, на входном торце), перестают совпадать по мере распространения излучения по световоду, то есть становятся некоррелированными. При этом из-за интерференции несовпадающих по поперечному сечению световых полей с разными частотами суммарное распределение светового поля становится нестационарным. В то же время, если частотный интервал между двумя спектральными компонентами излучения таков, что фотоприемник усредняет (интегрирует) биения на частоте, равной этому интервалу, то суммарная структура распределения интенсивности на выходе световода будет регистрироваться фотоприемником как сумма двух стационарных некоррелированных спекл-структур. Как известно, такое сложение некоррелированных полей ведет к сглаживанию неоднородностей интенсивности, т. е. к уменьшению контраста спекл-структуры в регистрируемой фотоприемником суммарной картине.

При увеличении чисел спектральных компонентов поля N и пространственных компонентов A (в случае световода

пространственным компонентам соответствуют моды), вообще говоря, увеличивается и число формирующих световое поле некоррелированных пространственно когерентных составляющих. Это приводит ко все большему сглаживанию неоднородностей регистрируемой суммарной картины поля. Специальный расчет показывает, что максимальная величина контраста регистрируемой спекл-структуры светового поля C связана с числами спектральных компонентов N и пространственных компонентов A следующим соотношением:

$$\frac{A+N-1}{A \cdot N} \leq C^2$$

В случае световода численная величина A равна числу его возбужденных мод и зависит от параметров излучения и световода. Например, для световода со ступенчатым профилем показателя преломления $A = (\Delta \theta d / \lambda)^2$, где λ - длина волны излучения, a d - диаметр световода.

Отметим, что на практике уменьшение контраста может быть еще более значительным за счет того, что при распространении излучения по световоду оно может частично деполаризоваться, т.е. могут возбуждаться моды с поляризацией, ортогональной к исходной поляризации. Таким образом, в световоде может возникать дополнительная спекл-структура, которая не интерферирует со структурой, имеющей исходную поляризацию. Ясно, что наличие такой дополнительной структуры приведет к дополнительному сглаживанию регистрируемой картины светового поля.

На практике частотный спектр излучения может быть как дискретным, так и непрерывным. Понятно, что и в последнем случае регистрируемый контраст картины распределения интенсивности также будет уменьшаться по мере увеличения общей ширины спектра, поскольку условно весь спектральный диапазон можно разделить на N спектральных полос, играющих роль отдельных спектральных компонент.

Для количественной оценки длины световода, при превышении которой начинает сказываться эффект немонахроматичности излучения, разложим его поле по модам световода для случая двух спектральных линий [10]:

$$\begin{aligned} E(x, y, z, t) &= e^{i\omega_1 t} \sum_j C_j^{(1)}(z) E_j(x, y) + \\ &+ e^{i\omega_2 t} \sum_j C_j^{(2)}(z) E_j(x, y) = \\ &= e^{i\omega_1 t} \sum_j a_j e^{i\beta_j^{(1)} z} E_j(x, y) + \\ &+ e^{i\omega_2 t} \sum_j a_j e^{i\beta_j^{(2)} z} E_j(x, y) \end{aligned}$$

Здесь $\beta_j^{(1)}$ и $\beta_j^{(2)}$ - постоянные распространения отдельных мод, $\beta_j^{(i)} = k^{(i)} n_j$;

$k^{(i)} = 2\pi/\lambda_i$ - волновой вектор световой волны, λ_i - длина световой волны в вакууме,

n_j - эффективный показатель преломления моды световода с номером j .

При $z=0$ соответствующие компоненты светового поля для двух спектральных линий совпадают, поскольку $C_j^{(1)}(0) = C_j^{(2)}(0)$.

Проследим за процессом дефазировки мод, имеющих максимальную разность постоянных распространения. Возьмем, например, моду с наименьшим индексом

HE_{11} с постоянными распространения $\beta_0^{(1)}$ и $\beta_0^{(2)}$ на двух длинах волн λ_1 и λ_2 и моду с наиболее высоким индексом HE_{nn} с постоянными распространения $\beta_m^{(1)}$ и $\beta_m^{(2)}$ на двух длинах волн λ_1 и λ_2 , соответственно. Коэффициенты разложения поля в световоде по этим модам будут равны:

$$C_0^{(1)} = a_0 e^{i\beta_0^{(1)} z};$$

$$C_m^{(1)} = a_m e^{i\beta_m^{(1)} z};$$

$$C_0^{(2)} = a_0 e^{i\beta_0^{(2)} z};$$

$$C_m^{(2)} = a_m e^{i\beta_m^{(2)} z}.$$

На расстоянии L от входного торца световода разность фаз для этих мод при длине волны λ_1 будет равна:

$$\Delta\varphi_1 = (\beta_0^{(1)} - \beta_m^{(1)})L.$$

Для другой длины волны и тех же самых мод соответствующая разность фаз будет иметь другое значение:

$$\Delta\varphi_2 = (\beta_0^{(2)} - \beta_m^{(2)})L.$$

Очевидно, что отличие длин волн спектральных составляющих будет оказывать существенное влияние на рассогласование поперечных структур световых полей, формируемых за счет интерференции этих пар мод, если:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = [(\beta_0^{(1)} - \beta_m^{(1)}) - (\beta_0^{(2)} - \beta_m^{(2)})] \cdot L > 2\pi.$$

Как известно, $\beta = kn$,

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число световой

волны в вакууме; n - эффективный показатель преломления для данной моды.

Учитывая, что постоянные распространения для крайних мод определяются выражениями

$$\beta_0^{(1)} - \beta_m^{(1)} = \frac{2\pi}{\lambda_1} (n_0 - n_m) \text{ и } \beta_0^{(2)} - \beta_m^{(2)} = \frac{2\pi}{\lambda_2} (n_0 - n_m)$$

получаем

$$(n_0 - n_m) L \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) > 1 \text{ или } \Delta n \cdot L \cdot \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda} \equiv \frac{v}{\Delta v}.$$

Легко показать, что

величина $\Delta n = \frac{\Delta v}{v}$. С учетом этого из

предыдущего соотношения следует

$$L\Delta v > \frac{v^2}{\Delta v}$$

Это требование можно также представить в виде $\frac{L\Delta v}{v} > \frac{v}{\Delta v}$, из которого вполне ясен

его физический смысл. А именно, оно означает, что максимальная разность хода между различными модами на выходе из световода, равная $L\frac{\Delta v}{v}$, должна быть больше

длины когерентности используемого излучения, равной $\frac{v}{\Delta v}$.

Известно, что ΔV зависит от скорости распространения V , ширины углового спектра излучения $\Delta\theta$ и от распределения показателя преломления материала световода по поперечному сечению этого световода. Если, например, распределение имеет ступенчатый вид, то есть указанный показатель преломления одинаков по всему сечению световода, то:

$$\Delta V = V(\Delta\theta)^2/8n^2,$$

где n - показатель преломления.

Другое ограничение на длину световода связано с тем, что неодинаковость времен распространения различных мод по световоду не должна приводить к искажениям передаваемой информации. Другими словами, различие этих времен должно быть меньше временного интервала τ , несущего единицу информации (например, длительности импульса при амплитудной модуляции излучения). Учитывая, что

$$\tau \approx \frac{1}{\delta v},$$

где δv - полоса частот сигнала, получаем $\frac{L}{v_1} - \frac{L}{v_2} < \frac{1}{\delta v}$, здесь v_1 и v_2 - скорости

распространения в световоде различных мод, причем $v_1 - v_2 = \Delta V$. С учетом этого последнее неравенство можно записать в виде

$$L \cdot \delta v < \frac{v^2}{\Delta v}$$

"расплывание" импульса, обусловленное различием скоростей мод, будет меньше, чем длительность "битового интервала" τ .

В случае N спектральных линий светового излучения для реализации максимальных возможностей предлагаемого способа необходимо, чтобы спекл-структуры, соответствующие любым соседним линиям, утратили пространственную корреляцию на длине световода, подобно тому, как это продемонстрировано выше для случая двух спектральных линий. Для этого необходимо выполнение условия

$$L\Delta v > (N-1) \frac{v^2}{\Delta v}$$

Сущность заявляемого способа поясняется примерами его реализации и чертежом, на котором представлена упрощенная блок-схема устройства, с помощью которого способ может быть реализован.

Устройство для реализации способа содержит: 1 - источник оптического излучения вместе со средствами его модуляции; 2 - элемент для формирования заданного углового спектра излучения; 3 - световод; 4 - оптический коллектор (оптическая антенна).

Пример 1. Способ формирования световых пучков может быть реализован следующим образом.

Сначала определяют длину световода L , обеспечивающую передачу излучения от места нахождения излучателя 1 до оптической антенны 4, т.е. длина световода, зависящая от взаиморасположения излучателя и антенны, в данном случае является заданной величиной.

Излучатель должен быть подобран с шириной спектра Δv , определяемой из соотношения

$$L \cdot \Delta v > \frac{v^2}{\Delta v}$$

формулы изобретения. Величина $\frac{v^2}{\Delta v}$, как

показано в описании данного изобретения, зависит от ширины углового спектра излучения $\Delta\theta$. Этот угловой спектр формируется оптической системой, сложность и стоимость которой невелика, если $\Delta\theta \leq 0.3$. Величина $\Delta\theta = 0.3$ при использовании стандартных кварцевых световодов со ступенчатым профилем показателя преломления соответствует

$$\frac{v^2}{\Delta v} = 4 \cdot 10^{10} \text{ м/с.}$$

Соответственно, ширину спектра Δv в данном примере следует вычислять по формуле

$$\Delta v > \frac{4 \cdot 10^{10}}{L} \text{ с}^{-1}$$

Из сравнения соотношений следует, что полоса

$$L \cdot \Delta v > \frac{v^2}{\Delta v} \text{ и } L \cdot \delta v < \frac{v^2}{\Delta v}$$

частот модулирующего сигнала δv всегда меньше, чем Δv . Таким образом, при используемых длинах световода порядка нескольких метров величина δv не должна превышать $\sim 10^{10} \text{ с}^{-1}$. В существующих линиях открытой оптической связи обычно используется $\delta v \leq 10^9 \text{ с}^{-1}$. Следовательно, предлагаемый способ не накладывает неприемлемых ограничений на полосу частот δv и тем самым на скорость передачи информации.

В линиях оптической связи нередко используются лазеры, спектр излучения которых состоит из нескольких эквидистантных линий. Число этих линий N должно обеспечивать уменьшение контраста C спекл-картины излучения на выходе световода до заданного уровня. Необходимое число N можно оценить, используя выражение $\frac{A+N-1}{A \cdot N} \leq C^2$, входящее в

формулу изобретения. Анализ этого выражения показывает, что данное условие может быть выполнено лишь в том случае, если одновременно удовлетворяются два неравенства: $1/A < C^2$ и $1/N < C^2$. Поэтому, пользуясь вторым неравенством, можно оценить N .

Задав N , следует найти величину A из соотношения $\frac{A+N-1}{A \cdot N} \leq C^2$.

Как показано в описании настоящего изобретения, величина A прямо связана с диаметром световода d . Эта связь, например, для световода со ступенчатым профилем показателя преломления выражается

соотношением $A = \left(\frac{\Delta\theta \cdot d}{\lambda} \right)^2$, где λ -

длина волны используемого излучения. Для известной длины волны излучения вычисляем диаметр d , удовлетворяющий указанному соотношению. Тем самым оказывается вычисленным последний параметр, необходимый для построения прибора, реализующего предложенный способ.

После этого может быть осуществлено построение такого прибора.

Для этого излучение с шириной спектра $\Delta\nu$, выходящее из излучателя, модулируют сигналом с полосой частот $\delta\nu$ в блоке 1 и направляют пучок этого излучения на элемент 2, выполненный, например, в виде линзы или аналогичной оптической системы, который преобразует падающий на него пучок с произвольной шириной углового спектра в пучок с заданной шириной углового спектра $\Delta\theta$, который направляется на

входной торец световода 3. Вышедший из другого торца световода световой пучок попадает на оптическую антенну 4, с помощью которой он концентрируется и направляется на абонентский приемник. В результате получается несущий информацию световой пучок с существенно ослабленными неоднородностями светового поля.

Пример 2. Зададим предельный уровень контраста спекл-структуры излучения на выходе световода равным 35% ($C=0,35$). Требуемое число спектральных линий N и мод световода A легко определить из содержащегося в формуле изобретения условия $\frac{A+N-1}{A \cdot N} \leq C^2$. Из него следует

$$A \geq \frac{N-1}{NC^2-1}.$$

Поскольку величина A всегда положительна, из последнего неравенства следует $N > \frac{1}{C^2}$. Для $C=0,35$ отсюда

получаем $N \geq 8$.

В соответствии с этим расчетом выберем источник излучения с числом эквидистантных спектральных линий $N=11$.

Подставляя это значение в выражение $A \geq \frac{N-1}{N \cdot C^2 - 1}$, мы получаем $A \geq 29$. Выберем

световод со ступенчатым профилем показателя преломления. Для него, как указывалось выше, число

$$A = \left(\frac{\Delta\theta \cdot d}{\lambda} \right)^2,$$

где $\Delta\theta$ - ширина углового спектра излучения с длиной волны λ , попадающего в световод диаметром d . В соответствии с этим выражением условие $A \geq 29$ выполняется при

$$d \geq \sqrt{29} \cdot \frac{\lambda}{\Delta\theta}.$$

Зададим $\lambda = 10^{-6}$ м и $\Delta\theta = 0,3$. Тогда из предыдущего выражения получим $d \geq 1,8 \cdot 10^{-5}$ м.

Промышленность выпускает световоды, удовлетворяющие полученному критерию - например, световоды диаметром $5 \cdot 10^{-5}$ м, которые и могут быть использованы в данном случае.

Зададим ширину полосы частот модулирующего сигнала $\delta\nu = 10^9$ с⁻¹. Спектральные линии излучения могут быть выбраны отстоящими друг от друга на 10^{10} с⁻¹, что при $N = 11$ дает полную ширину спектра $\Delta\nu = 10^{11}$ с⁻¹. Промышленные световоды со ступенчатым профилем показателя преломления имеют $n \approx 1,5$ (чему соответствует средняя скорость распространения мод в световоде $V \approx 2 \cdot 10^8$ м/с). При таком N и $\Delta\theta = 0,3$ рад, $\Delta V = 5 \cdot 10^{-2} \cdot V = 10^6$ м/с. При этом $V^2 / \Delta V = 4 \cdot 10^{10}$ м/с и

$$N \cdot \frac{V^2}{\Delta V} = 4 \cdot 10^{11}.$$

Для удовлетворения условий, указанных в формуле изобретения, длину световода L можно выбрать равной 5 м. При этом $L \cdot \Delta\nu = 5 \cdot 10^{11}$ м/с и $L \cdot \delta\nu = 5 \cdot 10^9$ м/с.

Таким образом, в описанном примере удовлетворяются условия

$$L \cdot \Delta\nu > \frac{V^2}{\Delta V} > L \cdot \delta\nu,$$

$$L \cdot \Delta\nu > N \cdot \frac{V^2}{\Delta V},$$

$$\frac{A+N-1}{A \cdot N} \leq C^2.$$

Последующие действия по реализации соответствующего устройства аналогичны описанным в примере 1.

Пример 3. Выберем в качестве источника излучения один из стандартных полупроводниковых лазеров, излучающих на нескольких продольных модах резонатора. Как известно, частотный интервал между такими модами равен $\Delta\nu_1 = c_0 / 2l \cdot n_1$, где c_0 - скорость света в вакууме ($3 \cdot 10^8$ м/с), l - длина лазерного резонатора и n_1 - показатель преломления среды, заполняющей резонатор.

Для мощных полупроводниковых лазеров характерны величины $l \approx 0,7 \cdot 10^{-3}$ м и $n_1 \approx 3,5$. Соответственно, для этих лазеров $\Delta\nu_1 \approx 6 \cdot 10^{10}$ с⁻¹.

Подбором тока питания переведем лазер в режим генерации двух продольных мод. В этом случае полная ширина спектра лазерного излучения $\Delta\nu$ совпадает с величиной $\Delta\nu_1$, равной, например, $6 \cdot 10^{10}$ с⁻¹, а число спектральных линий $N=2$.

Выберем лазер с длиной волны генерируемого излучения $\lambda = 1,5 \cdot 10^{-6}$ м, световод со ступенчатым профилем показателя преломления диаметром $d = 40 \cdot 10^{-6}$ м, а также зададим ширину углового спектра $\Delta\theta = 0,3$. Для этих значений параметров число возбуждаемых мод световода $A = \left(\frac{\Delta\theta \cdot d}{\lambda} \right)^2$ равно 64.

Подставляя $A = 64$ и $N = 2$ в выражение $\frac{A+N-1}{A \cdot N} \leq C^2$, получим, что в данном случае

реализуется контраст, не превышающий $C \approx 0,7$. Эта величина во многих случаях достаточна для надежной работы аппаратуры.

Отметим, что указанная выше величина

характеризует максимально возможные неоднородности принимаемого пучка излучения, регистрируемые точечной приемной апертурой. В реальных случаях апертура, разумеется, имеет конечный размер. Если этот размер сравним с поперечными размерами пятен спекл-картины, то флуктуации эффективно дополнительно сглаживаются в приемнике, и регистрируемая величина контраста становится меньше рассчитанной выше.

К дополнительному сглаживанию приводит также деполяризация излучения в световоде.

Поскольку параметр $\Delta\theta$ в данном примере имеет ту же величину, что и в примерах 1 и 2, а величина $\Delta\nu$ близка к использованной в этих примерах, требования к $\delta\nu$ и L в данном примере приблизительно такие же, как в предыдущих примерах. Располагая значениями всех параметров, можно теперь реализовать конкретное устройство формирования пучка излучения путем операций, указанных в примере 1.

Источники информации

1. P.F. Szajowski et al, Proc. SPIE, 2001, v.4214, p.1.
2. G.Nykolak et al, Proc. SPIE, 2001, v.4214, p.11.
3. D.M. Britz et al, Proc. SPIE, 2001, v.4214, p.63.
4. J.P. Dodley et al, Proc. SPIE, 2001, v.4214, p.72.
5. ЕПВ 112076, Н 01 S 03/23, 1984.
6. US Patent No.5786923, 359/172, 1996.
7. PCT 00/04653, Н 04 В 10/00.
8. Дж. Гудман. Статистическая оптика. "МИР", М., 1988.
9. PCT 89/08954, Н 04 В 9/00.
10. A. W. Snyder, J. D. Zove: Optical Waveguide Theory, London, N.J., 1986.

Формула изобретения:

1. Способ формирования световых пучков для систем открытой оптической связи, включающий пропускание модулированного светового излучения через световод и последующую его концентрацию оптической антенной, отличающийся тем, что световое излучение формируют с шириной частотного спектра $\Delta\nu$ и шириной углового спектра $\Delta\theta$, превышающей дифракционный угол, соответствующий диаметру световода, а также модулируют это излучение сигналом с

полосой частот $\delta\nu$ и преобразуют его в несколько мод световода с максимальной разностью скоростей между ними ΔV , причем параметры излучения и световода выбирают, исходя из условий

$$L\delta\nu < \frac{v^2}{\Delta V};$$

$$L\Delta\nu > \frac{v^2}{\Delta V}.$$

где L - длина световода, м;

ΔV - ширина частотного спектра

формируемого светового излучения, c^{-1} ;

$\delta\nu$ - полоса частот модулирующего

сигнала, c^{-1} ;

V - средняя скорость распространения мод по световоду, м/с;

ΔV - максимальная разность между скоростями распространения различных мод, возбуждаемых излучением в световоде, м/с, зависящая от распределения показателя преломления материала световода по поперечному сечению этого световода и от ширины углового спектра $\Delta\theta$;

$\Delta\theta$ - ширина углового спектра светового излучения, направляемого на входной торец световода.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что частотный спектр светового излучения формируют из спектральных линий, минимальное расстояние между которыми превышает $\delta\nu$.

3. Способ по п.2, отличающийся тем, что световое излучение формируют с числом спектральных линий N и шириной углового спектра $\Delta\theta$, обеспечивающей возбуждение A мод световода, причем N и A выбирают исходя из условия

$$\frac{A+N-1}{AN} \leq c^2,$$

где N - число спектральных линий;

A - число мод, возбуждаемых в световоде каждой спектральной линией;

C - заданный контраст спекл-структуры светового поля на выходе световода.

4. Способ по п.2, отличающийся тем, что параметры светового излучения и световода выбирают, исходя из условия

$$L\Delta\nu > (N-1) \frac{v^2}{\Delta V}.$$

50

55

60