

В.И. Аджалов

О ВОЗМОЖНОСТЯХ МЕТОДА МОДОВОЙ МОДУЛЯЦИИ - ПРЕОБРАЗОВАНИЯ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ В ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА МОД, ВОЗБУЖДАЕМЫХ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

Практические достижения в области разработки и внедрения систем передачи информации на основе многомодовых оптических волокон обуславливают актуальность поиска новых возможностей таких систем, повышения надежности передачи сигналов, их устойчивости к внешним воздействиям. В настоящей работе рассматривается один из путей расширения функциональных возможностей многомодовых волоконно-оптических систем передачи информации, базирующийся на естественных особенностях распространения электромагнитных волн в многомодовых световодах: дискретно-модовом характере распространения и модовой дисперсии.

Модовый характер распространения излучения в волоконно-оптических системах ранее привлекал внимание в основном в связи с решением задачи уплотнения сигналов (см., например, [1]), за счет раздельной аналоговой модуляции отдельных мод с последующим их независимым детектированием. Впервые целесообразность получения информации о сигнале путем анализа состава возбуждаемых в световоде мод была обоснована в рамках исследования предельной чувствительности амплитудных датчиков на основе многомодовых градиентных световодов [2].

Предлагаемый подход непосредственно основан на преобразовании исходного сигнала в распределение состава возбуждаемых в световоде мод. В качестве исход-

ного уровня энергии $G_n(t, z)$, переносимой каждой из мод порядка n на входном отрезке световода ($z=0$) в любой момент времени $G_n(t, 0)$, примем два уровня - нулевой и единичный. Простейшим примером такого преобразования может служить линейное преобразование нормированного положительного аналогового сигнала $g(t)$ в число возбуждаемых в световоде мод

$$G_n(t, 0) = \begin{cases} 1 & g(t) \geq \frac{n-1}{N-1} \\ 0 & g(t) < \frac{n-1}{N-1} \end{cases}, \quad (1)$$

т.е. при $g(t)=g(t) \equiv 1$ возбуждается полное число мод световода N , при $g(t)=g(t) \equiv 0$ возбуждается одна мода низшего порядка и т.д. (такое преобразование может быть реализовано при пропорциональном величине сигнала изменений угла схождения возбуждающего световод пучка излучения).

На выходе световода сигнал каждой моды будем рассматривать как дискретный марковский процесс на два состояния, и обратное преобразование осуществлять путем анализа уровней энергии, переносимых модами на выходном отрезке волокна. Для преобразования вида (1), в частности, обратное преобразование в его тривиальной реализации может заключаться в определении угла, под которым излучение распространяется на выходе из торца световода, с учетом прямой зависимости этого угла от порядка мод.

Возможности передачи сигналов за счет изменения состава возбуждаемых в световоде мод определяются, в первую очередь, длиной эффективной межмодовой связи. Если изменения уровня затухания не связаны с изгибами оси оптического волокна и существенно не изменяют распределение эффективного показателя преломления, дальность передачи будет в первом приближении определяться уровнем технологии изготовления самого многомодового градиентного световода и может уже в настоящее время достигать нескольких километров [3].

Рассмотрим ограничения, возникающие при активизации межмодовой связи из-за внешних воздействий. Изгибы оси волокна, описываемые функцией $f(z)$, приводят, как известно [2], к перераспределению энергии начальной моды порядка n с постоянной распространения β_n между конечными модами порядка m так, что средняя постоянная распространения конечного пучка становится равной

$$\langle \beta \rangle = \beta_n + v, \quad v = |d|^2, \quad d(z) = i\sqrt{\frac{k}{\omega}} \int_0^z f(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau, \quad (2)$$

причем наиболее эффективный обмен энергиями происходит между модами, постоянные распространения которых удовлетворяют условию

$$|\beta_n - \beta_m| = 2\pi \cdot \omega \quad (3)$$

(градиентный световод предполагается продольно-однородным).

Коэффициенты связи мод для произвольной функции $f(z)$ симметричны по индексам m и n и выражаются через обобщенные полиномы Лагерра [4]

$$W_m^n = \frac{l_1!}{l_2!} v^{|m-n|} \cdot l_1^{-v} \cdot |L_{l_1}^{m-n}(v)|^2, \quad (4)$$

где $l_1 = \min(m, n)$, $l_2 = \max(m, n)$.

Предположим, что восстановление аналогового сигнала на выходе световода осуществляется путем анализа поля, формируемого в каждый момент времени на его торце (при условии на характерное время изменения сигнала $\tau_c \gg \beta_n \cdot z$ для любого n и z , $0 \leq z \leq L_0$, L_0 - полная длина световода).

Полный модовый состав когерентного поля на входе и выходе световода с комплексными амплитудами $E_{вх}(t, \vec{x})$ и $E_{вых}(t, \vec{x})$ определим как

$$\begin{aligned} E_{вх}(t, \vec{x}) &= \sum_1^N E_n(t) \psi_n(\vec{x})_{z=0}, \\ E_{вых}(t, \vec{x}) &= \sum_1^N E_n(t) \psi_n(\vec{x})_{z=L_0}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$|E_n(t)_{z=0}|^2 = G_n(t, 0), \quad |E_n(t)_{z=L_0}|^2 = G_n(t, L_0),$$

где $\{\psi_n(\vec{x})\}$ - система базисных функций, соответствующих поперечно-модовым конфигурациям.

При этом в первом приближении,

$$G_n(t, L_0) \approx \left[G_n(t, 0) + \sum_{m=1}^N W_m^n(t) G_m(t, 0) - \sum_{m=1}^N W_n^m(t) G_n(t, 0) \right] \cdot k_\alpha, \quad (6)$$

где k_α - коэффициент пропускания сигнала в линии.

Для каждой конкретной функции, описывающей изгиб оси $f(z)$, из соотношений (2), (4), (6) может быть определена максимальная дальность передачи L_0 , обеспечивающая адекватную передачу $\{G_n(t, 0)\}$ в $\{G_n(t, L_0)\}$.

В более широкой постановке задача определения максимальной дальности передачи может решаться путем оптимизации закона преобразования сигнала $g(t)$ в вид $\{G_n(t, 0)\}$, т.е. оптимизацией распределения информации в сигнале $g(t)$ по модам световода. Непосредственное решение этой задачи целесообразно проводить с учетом априорной информации о возможном классе функций и, в особенности, реальных возможностях физической и аппаратной реализации преобразования $g(t)$ в $\{G_n(t, 0)\}$. Вместе с тем, в случае произвольной $f(z)$ весьма полезными являются известные [2] оценки влияния на межмодовую связь резонансного искривления оси световода с периодом, равным периоду осцилляции параксиальных лучей, $f(z) = A \sin \omega z$. При $\omega z \geq 1$, т.е. на расстояниях, больших периода осцилляции,

$$d(z) = \frac{Az}{2} \sqrt{\frac{k}{2\omega}}, \quad (7)$$

где k - волновое число, и для максимальной длины сохранения состояния $G_n(t, z) = 1$ получаем оценку

$$L_{on} \approx \frac{2}{A} \sqrt{\frac{2\omega}{k(2n+1)}}. \quad (8)$$

Таким образом, если функция содержит непрерывный некоррелированный набор пространственно-частотных компонент (т.е. если $f(z)$ описывает воздействие белого шума), преобразование сигнала в число возбуждаемых мод (распределение информации по модам) должно быть неравномерным в соответствии с определяемой соотношением (8) нелинейной зависимостью максимальной длины эффективной межмодовой связи от номера моды.

Дополнительные возможности рассмотренного метода модовой модуляции могут быть реализованы при использовании эффекта модовой дисперсии, рассматриваемого традиционно только как фактор, ограничивающий возможности многомодовых волоконно-оптических систем передачи информации.

Предположим, что при возбуждении световода одновременно полным составом мод импульсный отклик световода описывается функцией $h_N(t-t_0)$ с шириной τ_N . В качестве сигнала выберем последовательность импульсов длительности $\tau_0 \ll \tau_N$, поступающих с периодом $T_0 > \tau_N$, причем каждый импульс возбуждает число мод $n(t)$, определяемое соотношением (1). В этом случае длительность сигнала на выходе световода будет определяться дисперсией исходного импульса, которая будет скла-

дываться из дисперсии исходного распределения мод и дисперсии вновь возбуждаемых внутри световода мод [1]. Приведенная выше оценка длины межмодовой связи здесь также справедлива, однако длина межмодового взаимодействия не является при этом максимально возможной длиной передачи. В отличие от ранее рассмотренной ситуации, когда принимаемый сигнал определяется из наличия или отсутствия заданного уровня возбуждения той или иной моды (пространственный анализ поля выхода световода), можно использовать временной анализ – определение длительности функции отклика $\tau_{\Sigma}(n)$ на посылку единичного импульса, возбуждившего изначально число мод n . При достижении длины полной эффективной межмодовой связи (равновесного распределения мод), пространственный анализ непосредственно не позволяет определить, какие моды изначально были возбуждены, однако функция отклика требуемую информацию содержит, т.к.

$$\tau_{\Sigma}(n) \approx \tau_n + \sum_i \Delta\beta_{ni} \cdot z_i, \quad (9)$$

где τ_n – длительность импульсного отклика, соответствующего дисперсии n мод; z_i – длина, соответствующая распространению изначально не возбужденной моды i ; $\Delta\beta_{ni}$ – разность постоянных распространения мод n и i (для упрощения анализа предполагаем, что моды переносят равную энергию).

Следовательно, длительность отклика τ_{Σ} при равновесном распределении мод определяется не только условиями распространения, но и исходным составом мод, изменяясь в пределах от

$$\begin{aligned} \tau_{\Sigma}^{\min} &= \sum_{i=1}^N \Delta\beta_{ni} z_i \text{ для } n=1 \\ \text{до } \tau_{\Sigma}^{\max} &= \tau_N \text{ для } n=N, \end{aligned} \quad (10)$$

т.е. максимальная дальность передачи может значительно превышать длину эффективной межмодовой связи (например, при $\tau_{\Sigma}^{\min} \ll \tau_{\Sigma}^{\max}$).

Анализ исходного состава возбужденных мод путем измерения $\tau_{\Sigma}(t)$ обладает еще одним принципиальным преимуществом по сравнению с пространственным анализом – повышенной устойчивостью к изменениям уровня потерь в линии, не связанных с изменением межмодовой связи, поскольку в этом случае меняется лишь амплитуда функции $h_{\Sigma}(t)$, но не ее длительность $\tau_{\Sigma}(t)$.

Приведенные выше оценки не могут, очевидно, обеспечить всеобъемлющий анализ возможностей метода модовой модуляции, однако позволяют сделать некоторые предварительные выводы.

Во-первых, существует возможность адекватного преобразования и передачи сигналов рассмотренным методом, если преобразования сигналов по модам, например, квантование аналогового исходного сигнала по числу мод в соответствии с условием (1), удовлетворяет общим требованиям на качество передачи (заметим, что число мод, суть уровней квантования, в серийных многомодовых волокнах достигает нескольких сотен). При этом дальность передачи определяется длиной эффективной межмодовой связи, которая в случае активизации этой связи за счет искривлений оси оптического волокна, в свою очередь, определяется функцией, описывающей изгиб.

Во-вторых, для корректного определения максимально возможной дальности передачи необходимо определить закон преобразования функции $g(t)$ в распределение $\{G_n(t, 0)\}$ и задать критерий адекватности преобразования распределения $\{G_n(t, 0)\}$ в распределение $\{G_n(t, L_0)\}$ (в зависимости от решаемой технической задачи, определяющей требования к каналу связи, это могут быть заданная вероят-

ность ошибки, минимальное отношение сигнал-шум для каждой G_n , уровень корреляции распределений $\{G_n(t, 0)\}$ и $\{G_n(t, L_0)\}$ и т.п.). При этом следует отметить, что закон преобразования сигнала в распределение мод следует определять с учетом неодинаковой чувствительности мод к внешним воздействиям (как коррелированным, так и некоррелированным), т.е. информацию о сигнале следует в общем случае распределять по модам неравномерно, задаваясь условием одинаковой вероятности ошибки приема порций информации, передаваемых разными модами.

В-третьих, интегральные колебания уровня потерь в линии k_α , обусловленные источниками потерь, которые не связаны с обменом энергиями между модами, воздействуют на сигнал иным образом, чем в традиционных способах аналоговой модуляции, ослабляя все моды одинаково. Соответственно, могут быть использованы методы приема сигналов, компенсирующие до некоторой степени изменения k_α , например, введение единой автоматизированной регулировки усиления для всех модовых каналов при детектировании.

Заслуживает внимания ранее упомянутая особенность предложенного подхода - его квазицифровая сущность. Световод играет роль аналого-цифрового преобразователя, преобразующего исходный сигнал в первом случае в набор дискретных мод, а во втором случае - в импульс заданной длительности (отметим, что для маломодового световода этот импульс может превращаться в последовательность дискретных импульсов). Соответственно, для анализа сигнала на выходе световода может быть использована дискретная элементная база как существующая (например, для измерения длительности и/или счета импульсов на выходе световода), так и создаваемая (голограммные элементы для анализа состава мод световода [4]).

Л и т е р а т у р а

1. К о з а н н е А., Ф л е р е Ж., М е т р Г., Р у с с о М. Оптика и связь: Оптическая передача и обработка информации. М.: Мир, 1984.
 2. К р и в о ш л ы к о в С.Г., С и с а к я н И.Н. Функциональные возможности и чувствительность датчиков на основе многомодовых градиентных световодов. М.: Препринт ФИАН, № 70, 1986.
 3. М и д в и н т е р Дж.Э. Волоконные световоды для передачи информации. М.: Радио и связь, 1983.
 4. Г о л у б М.А., К р и в о ш л ы к о в С.Г., П р о х о - р о в А.М., С и с а к я н И.Н., С о й ф е р В.А. Пространственные фильтры для анализа и формирования поперечно-модовой структуры когерентного электромагнитного излучения. М.: Препринт ФИАН, № 21, 1983.
-