

В. С. Белявский, И. С. Манак, В. В. Тихонович

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОВОГО ДАЛЬНОМЕРА НА ЛАЗЕРНОМ ДИОДЕ С УЧЕТОМ ЕГО ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Фазовый метод измерения расстояний

В основе работы фазового светодальномера (ФСД) лежит фазовый метод измерения времени распространения модулированного аналоговым сигналом излучения инжекционного лазера, обеспечивающий малую погрешность, что необходимо при применении их в геодезии и в высокоточной дальнометрии.

Фазовый метод измерения расстояний иллюстрирует упрощенная схема ФСД, представленная на рис. 1. Предположим, что лазерный диод (ЛД) излучает гармоническое колебание круговой частоты ω с начальной фазой φ_0

$$U_1 = U_{m1} \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (1)$$

где U_{m1} – амплитуда напряжения, ω – частота модуляции, φ_0 – начальная фаза модуляции.

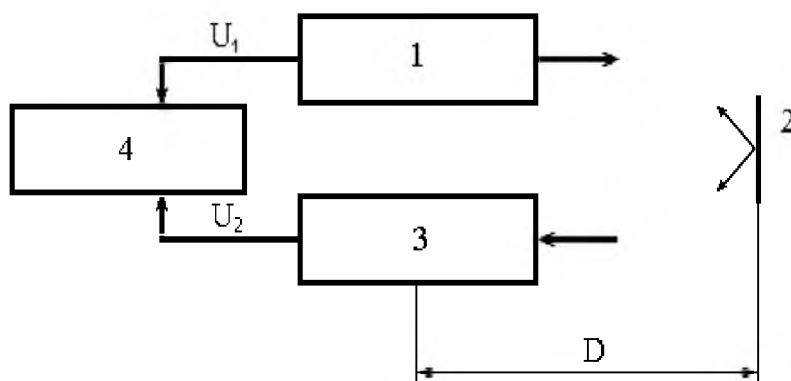


Рис. 1. Упрощенная схема фазового светодальномера:
1 – лазерный диод; 2 – отражатель; 3 – фотоприемник; 4 – фазометр

Пройдя расстояние D до отражателя и обратно, сигнал попадает на фотоприемник, на выходе которого формируется гармоническое колебание с амплитудой U_{m2} и фазой, задержанной на время τ_{2D} :

$$U_2 = U_{m2} \sin[\omega(t - \tau_{2D}) + \varphi_0]. \quad (2)$$

При этом формула (2) не учитывает фазовые сдвиги в цепях передатчика и приемника. Фазометром измеряется разность фаз напряжений U_1 и U_2

$$\varphi_{2D} = \omega \tau_{2D} = 2\pi f \tau_{2D}. \quad (3)$$

Зная скорость распространения излучения вдоль измеряемого расстояния D , искомое расстояние получаем в виде

$$D = \frac{v\tau_{2D}}{2} = \frac{v\varphi_{2D}}{4\pi f}. \quad (4)$$

Простейший фазовый светодальномер позволяет однозначно определять расстояния лишь до половины длины волны λ , соответствующей частоте модуляции f , когда $\varphi < 2\pi$.

Современные лазерные диоды позволяют принципиально измерять расстояния в дневных условиях до нескольких километров, а ночью до нескольких десятков километров в пределах прямой видимости, что ограничивается мощностью генерируемого ими излучения, и особенностями приема.

Причины возникновения пространственно-временной структуры излучения

Для полупроводниковых источников при амплитудной модуляции и импульсном возбуждении характерно некоторое запаздывание излучения относительно управляющего напряжения на p - n -переходе. Это запаздывание связано с накоплением заряда в активной области и достижением системой состояния инверсной пороговой населенности. Одновременно с указанными процессами идет рекомбинация неравновесных носителей заряда (ННЗ), препятствующая увеличению их концентрации. При описании релаксации ННЗ пользуются характеристическими временами: τ_u – время жизни ННЗ для спонтанных излучательных переходов; τ_b – безызлучательное время жизни ННЗ; τ_c – спонтанное время жизни ННЗ, определяемое как

$$\frac{1}{\tau_c} = \frac{1}{\tau_u} + \frac{1}{\tau_b}, \quad (5)$$

$\tau_{ст}$ – время жизни ННЗ для стимулированных излучательных переходов; τ_n – полное время жизни ННЗ, которое находится из соотношения [2]:

$$\frac{1}{\tau_n} = \frac{1}{\tau_u} + \frac{1}{\tau_b} + \frac{1}{\tau_{ст}}. \quad (6)$$

Распределение фазы φ по излучающей поверхности ЛД при сверхвысокочастотной модуляции есть функция времени жизни τ ННЗ и в простейшем случае дается выражением:

$$\varphi = \arctg(-2\pi f \tau_n). \quad (7)$$

Таким образом, при наличии областей с различными значениями времен жизни изменение фазовой задержки при переходе от первой области ко второй

$$\Delta\varphi = \arctg(-2\pi f'\tau''_{\text{н}}) - \arctg(-2\pi f'\tau'_{\text{н}}). \quad (8)$$

Неоднородность поля излучения вдоль p - n -перехода определяется наличием в полупроводнике локальных областей с различными временами жизни ННЗ, определяющими амплитудно-частотную и переходную характеристики лазера, а также задержку излучения относительно импульса излучающего тока. Различие во временах жизни носителей обусловлено неоднородностями концентрации легирующих примесей, дефектов структуры и тока инжекции по сечению перехода.

Для ЛД, используемых в фазовых дальномерах, характерны вариации фазы модуляции в ближней зоне. Они могут быть обусловлены как выше описанными причинами так и дефектами изготовления. Разброс фазы модуляции при частоте 1 ГГц может достигать 40° , в диодах с широким омическим контактом, и приводить к значительной погрешности при измерении расстояний. Погрешность учитывающая систематические фазовые сдвиги, вносимые модулятором и детектором света, реальное положение точек начала и конца измеряемой линии в апертуре светодальномера и отражателя, временные и фазовые задержки в электрических цепях, прохождение модулированного света в оптических средах с показателем преломления, отличным от среднего показателя преломления атмосферы, обычно не превышает 1° .

Очевидно, что при конструировании высокоточных фазовых дальнометров вариации фазы модуляции представляют значительную проблему.

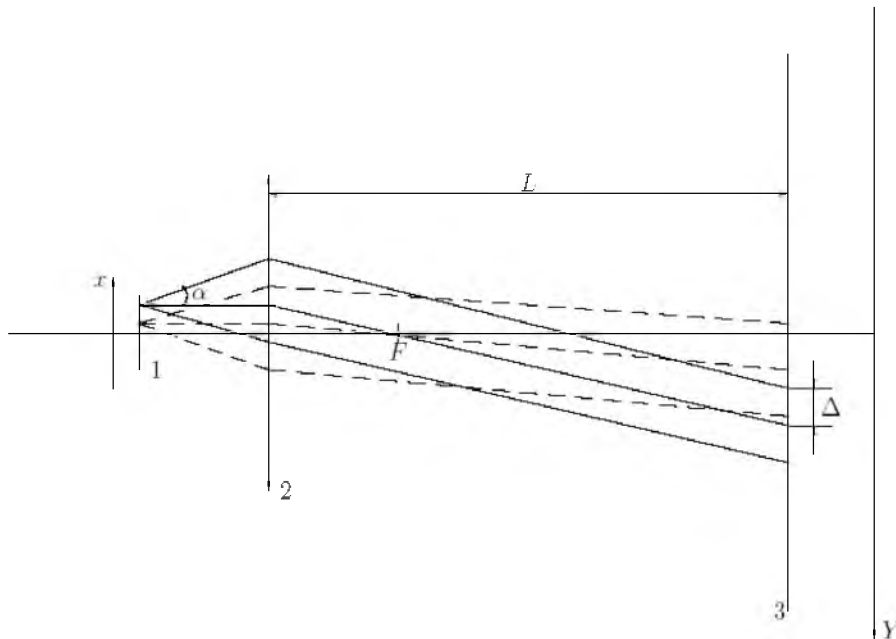


Рис. 2. Схема хода луча в моделируемом дальнометре

Модель дальномера

Измерительная система (рис. 2) состоит из лазерного диода 1, объектива 2 ($F = 10$ см) и "экрана" 3. "Экран" в данном случае название условное, так как обозначает плоскость, в которой происходит изучение распределения фазы модуляции излучения. Он находится на расстоянии 1 км от линзы. Угловой многоэлементный отражатель можно в систему не включать, а считать, что объектив находится на расстоянии двух измеряемых дистанций в плоскости "экрана". Угол расходимости излучения α лазерного диода с широким омическим контактом и областью излучательной рекомбинации длиной 100 мкм принимался равным 10° .

Так как излучатель располагался в фокальной плоскости в силу конечности его размеров (неточечный источник) на дистанцию подавался не параллельный расходящийся пучок, формирующий на экране изображение размером около 1 метра.

Пространственно-временная структура излучения

На формирование сигнала, в области размером 2Δ и координатой Y в плоскости экрана, влияют все участки излучающей поверхности диода, центральные лучи которых попадают в область $(Y - \Delta; Y + \Delta)$. Центральным лучом полагается луч, излученный диодом из некоторой точки перпендикулярно плоскости диода. Тогда справедлив следующий интеграл:

$$I(Y, t) = \frac{K}{2\Delta} \int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz) g(Kz, t - \tau_L) dz. \quad (9)$$

где 2Δ – длина участка, на котором анализируется распределение интенсивности и фаза модуляции излучения, $I_0(Kz)$ – распределение интенсивности по диоду, $1/K$ – коэффициент увеличения оптической системы ($x = KY$) $K = F/(L - F)$, $g(Kz, t)$ – функция модуляции излучения.

В случае модуляции излучения лазерного диода аналоговым сигналом

$$g(Kz, t) = 1 + p \sin(\omega t + \varphi(Kz)), \quad (10)$$

где ω – частота модуляции, p – коэффициент глубины модуляции излучения, $\varphi(Kz)$ – фаза модуляции в ближней зоне.

Нахождение пространственно-временной структуры излучения в дальней зоне (в плоскости "экрана") возможно при любом законе модуляции излучения путем прямого численного нахождения интеграла (9). Однако в этом случае необходимо решать численное уравнение, частью которого и является интеграл (9).

В случае же модуляции излучения лазерного диода аналоговым сигналом при подстановке (10) в (9) получаем:

$$I(Y, t) = \frac{K}{2\Delta} \int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz) (1 + p \sin(\omega(t - \tau_L) + \varphi(Kz))) dz. \quad (11)$$

После преобразования (11) имеем:

$$I(Y, t) = \frac{Kp}{4\Delta} \left(\sin(\omega(t - \tau_l)) \int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz) \cos(\varphi(Kz)) dz + \cos(\omega(t - \tau_l)) \int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz) \sin(\varphi(Kz)) dz \right) + \frac{K}{2\Delta} \int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz) dz. \quad (12)$$

Так как интегралы $\int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz) \cos(\varphi(Kz)) dz$, $\int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz) \sin(\varphi(Kz)) dz$ и $\int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz) dz$ не зависят от времени, то (12) можно преобразовать к виду:

$$I(Y, t) = \frac{K}{4\Delta} (A(Y) \sin(\omega(t - \tau_l) + \Theta(Y)) + I_{0Y}(Y)), \quad (13)$$

где

$$A(Y) = \frac{Kp}{2\Delta} \sqrt{\left(\int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz) \cos(\varphi(Kz)) dz \right)^2 + \left(\int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz) \sin(\varphi(Kz)) dz \right)^2}$$

$$\Theta(Y) = \arctg \left(\frac{\int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz) \sin(\varphi(Kz)) dz}{\int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz) \cos(\varphi(Kz)) dz} \right), \quad I_{0Y} = \frac{K}{2\Delta} \int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz) dz$$

Из выражения (13) видно, что форму результирующего сигнала определяют три величины A , Θ и I_{0Y} . С помощью этих величин можно произвести полный анализ искажений сигнала.

Анализ вариаций фазы модуляции излучения в дальней зоне

При моделировании распределения фазы модуляции излучения ЛД интенсивность по всей области диода принималась постоянной, а распределение начальной фазы в ближней зоне задавалась следующим образом: с шагом 10^{-5} м случайным образом значения фазы изменялись в пределах от 0° до 20° и интерполировались на всю область диода с помощью кубического сплайна. В результате моделирования описанной выше системы получено следующее распределение фазы модуляции излучения представленное на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что разброс фазы на объективе уменьшился по сравнению с разбросом фазы в ближней зоне для некоторых участков примерно на 4° и варьируется в пределах $\sim 10^\circ$.

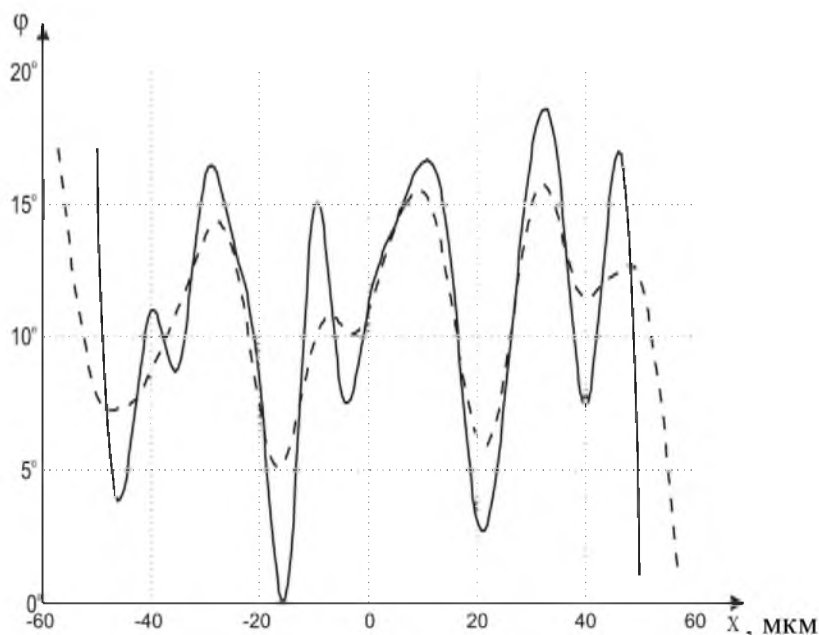


Рис. 3. Зависимость фазы модуляции в ближней зоне ЛД (сплошная линия) и результирующей фазы модуляции излучения на объективе (штриховая линия), пересчитанной в ближней зоне ЛД

Из рассмотренного видно, для заметного уменьшения влияния фазовой неоднородности излучения ЛД на точность измерений расстояний фазовыми дальномерами требуется использование передающих объективов с большим фокусным расстоянием или приемных большого диаметра. Однако такие объективы имеют большие размеры и вес и потому неудобны в применении.

Фазовый дальномер с разнесенными частотами модуляции

Найдем приближенное значение измеряемого расстояния D на двух существенно отличающихся частотах, например $f_1 = f$ и $f_2 = 2f$, и избавимся от неоднозначности в определении D для каждой из частот. Для каждого измерения напишем два уравнения: уравнение, связывающее измеряемое расстояние с вариацией фазы модуляции

$$D = \frac{v}{2f} N + \frac{\varphi + \varphi_0}{2\pi}, \quad (14)$$

и уравнение, связывающее вариацию фазы модуляции излучения с временем жизни ННЗ

$$\varphi_0 = \arctg(-2\pi f \tau_{\text{н}}), \quad (15)$$

где D – измеряемое расстояние, φ_0 – задержка фазы модуляции, определяется инерционностью источника излучения, v – скорость света; f – частота, на которой производится измерение; φ – фаза, полученная при измерении; $\tau_{\text{н}}$ – время жизни ННЗ в области ЛД, с которой принимается из-

лучение; N – количество полных волн, укладывающихся в измеряемое расстояние. Таким образом, для определения искомого расстояния имеем систему уравнений

$$\begin{cases} D = \frac{v}{2f_1} N_1 + \frac{\varphi_1 + \varphi_{10}}{2\pi} \\ D = \frac{v}{2f_2} N_2 + \frac{\varphi_2 + \varphi_{20}}{2\pi} \\ \varphi_{10} = \arctg(-2\pi f_1 \tau_{\text{п}}) \\ \varphi_{20} = \arctg(-2\pi f_2 \tau_{\text{п}}) \end{cases} \quad (16)$$

где f_1 и f_2 – частоты, на которых производятся измерения; φ_1 и φ_2 – фазы, полученные при измерении; φ_{10} и φ_{20} – задержки фазы модуляции излучения в источнике; N_1 и N_2 – количество полных волн укладывающихся в измеряемое расстояние на соответствующей частоте.

Нетрудно убедиться, что система (16) имеет единственное решение для $D > 0$ и $\varphi_{10}, \varphi_{20}$ принадлежащих промежутку $(-\pi/2; 0]$. Этим решением и будет точное значение расстояния. Отметим также, что решение системы (16) не может быть представлено в замкнутой форме, т.е. неизвестные $D, \varphi_{10}, \varphi_{20}$, нельзя задать в виде явных функций параметров f_1 и f_2, N_1, N_2 . Поэтому для ее решения следует применять численные методы.

Важным преимуществом такого подхода является то, что он не критичен к размерам приемного объектива.

Выводы

В результате проведенной работы разработана теоретическая база для расчета фазы и интенсивности излучения ЛД в месте положения приемного объектива фазового светодальномера. Установлено, что для фазы модуляции излучения на приемнике характерны значительные вариации, хотя они и существенно сглаживаются по сравнению с исходными, и с уменьшением размеров приемного объектива они возрастают. Учитывая, что для повышения удобства использования дальномеров в полевых условиях отражатель и оптику фотоприемника стремятся сделать малого размера, остается актуальным вопрос уменьшения погрешности измерения. Предложен метод, позволяющий повысить точность измерения расстояний при использовании ЛД с высокой неоднородностью фазы модуляции излучения.

Литература

1. Лазерная дальнометрия. Под ред. В.П. Васильева. М.: Радио и связь, 1995. 257 с.
2. *Карих Е. Д., Манак И. С.* Полупроводниковые лазеры: Конспект лекций. Мн.: БГУ, 1999. 199 с.