

УДК 528.517

Е. А. АИРАПЕТАН, К. С. ГЮНАШЯН, В. В. ИЛАСОВ

СВЕТОДАЛЬНОМЕР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛОМАНЫХ ЛИНИЙ

В процессе юстировки и наладки оптических телескопов и коротковолновых радиоантенн, при контроле прямолинейности осей крупногабаритных полых цилиндрических изделий, а также в крупном машиностроении и авиастроении возникает необходимость измерения ломаных в произвольных плоскостях линий. Для этих целей светодалномер и отражатель устанавливают, как и при обычных измерениях, в начале и в конце линии, а в точках ее излома — поворотные отклоняющие зеркала.

Подобные измерения, опыт которых получает все большее распространение, возможны при помощи светодалномеров, работающих в режиме амплитудной модуляции (или модуляции интенсивности), т. е. таких светодалномеров, для которых излом светового потока на отражающих поверхностях не приводит к нарушению физических принципов, заложенных в основу их построения.

Известно, что приборную погрешность светодалномеров на амплитудной модуляции нельзя уменьшить в настоящее время из-за таких факторов, как фазовая неоднородность модулированного светового потока, неидентичность процессов модуляции и фазового детектирования, и даже для приборов СВЧ-диапазона (например, ДК-001) она не меньше 1 мм [4].

Дальномеры с поляризационными модуляторами в СВЧ-диапазоне обеспечивают высокую точность измерений (0,2...0,3 мм) на расстоянии нескольких сотен метров, что вполне достаточно для решения указанных задач. Однако их применение при измерении ломаных линий, когда в точках излома устанавливаются зеркала, затруднено из-за деполяризации света на отражающих поверхностях и нарушения принципа работы прибора [1].

Осуществление измерений ломаных линий дальномерами, построенными на принципе модуляции светового потока по поляризации, возможно, но требует разворота модулятора и источника поляризованного света вокруг базового луча, несущего информацию о дистанции, в точном соответствии с углом разворота отклоняющего зеркала, что существенно усложняет конструкцию прибора и весь процесс измерений [2].

Задачу высокоточного измерения длин ломаных линий можно решить с помощью способа электрооптического измерения расстояний, предложенного авторами настоящей статьи, сочетаю-

щего в себе как достоинства светодальномеров с модуляцией по поляризации, так и возможности отклонения модулированного светового потока от прямой [3].

Модуляцию света, основанную на линейном электрооптическом эффекте, осуществляют при различной взаимной ориентации плоскости колебания электрического вектора \vec{E} поляризованного света, электрического поля, приложенного к электрооптическому кристаллу, и кристаллографических осей самого кристалла.

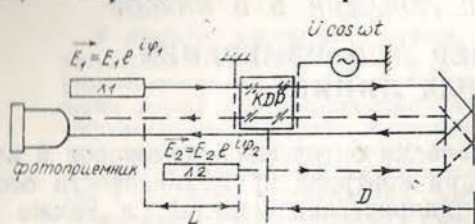


Рис. 1. Принципиальная схема светодальномера на фазовой модуляции параллельных световых потоков.

Рассмотрим возможность реализации фазового способа модуляции, когда направление распространения света и приложенное электрическое поле совпадают с оптической осью кристалла, а плоскость колебания электрического вектора поляризованного света параллельна оси X оптической индикатрисы.

Как известно [5], световой сигнал на выходе из кристалла приобретает фазовую задержку

$$\delta = \pi \frac{U}{U_\pi}, \quad (1)$$

где U — напряжение на кристалле, а U_π — полуволновое напряжение. Если напряжение U периодически с частотой ω_m , то выходящий из кристалла свет модулирован по фазе с частотой ω_m :

$$\delta = \pi \frac{U}{U_\pi} \cos \omega_m t. \quad (2)$$

Если свет двух когерентных источников A_1 и A_2 (рис. 1) пропустить через такой модулятор и измеряемое расстояние D , но так, что свет первого источника сначала модулируется и потом проходит дистанцию D , а свет второго источника модулируется после прохождения дистанции, то, соединив эти два световых потока на экране фотоприемника, можно получить результирующий световой сигнал, интенсивность которого будет зависеть от частоты модуляции и длины измеряемого расстояния.

Действительно, для световых потоков, прошедших модулятор, фазовые задержки составляют соответственно

$$\delta_1 = \pi \frac{U}{U_\pi} \cos \omega_m t, \quad \delta_2 = \pi \frac{U}{U_\pi} \cos (\omega_m t + \omega_m \Delta t), \quad (3)$$

где $\Delta t = (2D - L)/c$ — разность по времени прохождения лучей через кристалл, c — скорость света.

Обозначив полные фазовые сдвиги для этих потоков соответственно γ_1 и γ_2 в момент поступления их на фотоприемник, запишем выражения для электрического вектора световых волн

$$\begin{aligned}\vec{E}_1 &= \vec{E}_1 e^{i\gamma_1} = E_1 e^{i(\varphi_1 + \gamma_1)}, \\ \vec{E}_2 &= \vec{E}_2 e^{i\gamma_2} = E_2 e^{i(\varphi_2 + \gamma_2)},\end{aligned}$$

где φ_1 и φ_2 — начальные фазы световых потоков.

Суммарное световое поле на экране фотоприемника запишем

в виде $E = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = E_1 e^{i(\varphi_1 + \gamma_1)} + E_2 e^{i(\varphi_2 + \gamma_2)}$, а интенсивность света —

$$I = E \cdot E^* = [E_1 e^{-i(\varphi_1 + \gamma_1)} + E_2 e^{-i(\varphi_2 + \gamma_2)}] \times [E_1 e^{i(\varphi_1 + \gamma_1)} + E_2 e^{i(\varphi_2 + \gamma_2)}]. \quad (4)$$

После упрощения имеем

$$I = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \times \cos(\varphi_2 - \varphi_1 + \gamma_2 - \gamma_1). \quad (5)$$

Разность фаз $\gamma_2 - \gamma_1$ обусловлена разностью фазовых задержек $\delta_2 -$

$-\delta_1 = \delta$ и разностью путей, прошедших потоками $L = \frac{\Delta\gamma}{2\pi} \lambda_0$, где λ_0 — длина волны света. Таким образом, суммарная разность фаз составляет

$$\gamma_2 - \gamma_1 = \frac{2\pi L}{\lambda_0} + \delta. \quad (6)$$

При одинаковой интенсивности световых потоков $E_1 + E_2 = \sqrt{I}$ относительную интенсивность света на экране можно описать выражением

$$I/I_0 = 2 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi L}{\lambda_0} + \delta \right) \right] = 4 \cos^2 \left(\frac{\pi L}{\lambda_0} + \frac{\delta}{2} \right). \quad (7)$$

Выражение (7) является модуляционной характеристикой системы, представленной на рис. 1, и отличается от традиционной формулы для интенсивности интерферирующих немодулированных лучей тем, что измеряемое расстояние не зависит от длины волны света, но зависит от длины волны модулирующих колебаний, а величина $\pi L/\lambda_0$ позволяет осуществить выбор рабочей точки на характеристике. График функции (7) представлен на рис. 2.

По сравнению с модуляционной характеристикой поляризационной модуляции $I/I_0 = \sin^2 \delta/2$ характеристика (7) сдвинута на 180° и имеет амплитуду в два раза большую, так как при описываемой фазовой модуляции луч интенсивности I_0 делится пополам с равными интенсивностями.

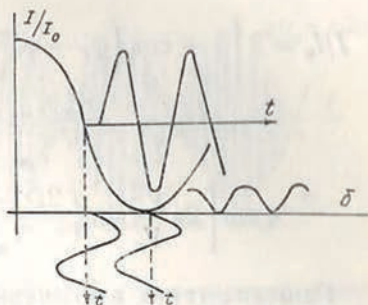


Рис. 2. Модуляционная характеристика системы.

Выражение (7) с учетом значения δ можно преобразовать:

$$I/I_0 = 2 \left[1 + \cos \left(\varphi_2 - \varphi_1 + \frac{2\pi L}{\lambda_0} \right) \cos (\delta_2 - \delta_1) - \right. \\ \left. - \sin \left[\left(\varphi_2 - \varphi_1 \right) + \frac{2\pi L}{\lambda_0} \right] \cdot \sin (\delta_2 - \delta_1) \right].$$

Подставляя $\delta_2 - \delta_1$, а также Δt , после некоторых упрощений получаем

$$I/I_0 = 2 \left\{ 1 + \cos \left(\varphi_2 - \varphi_1 + \frac{2\pi L}{\lambda_0} \right) \cos \left[2\pi \frac{V}{V_\pi} \sin \frac{\pi}{\lambda_m} (2D - L) \times \right. \right. \\ \times \sin \left(\omega_m t - \frac{2\pi D + \pi L}{\lambda_m} \right) \left. \right] - \sin \left(\varphi_2 - \varphi_1 + \frac{2\pi L}{\lambda_0} \right) \times \\ \times \sin \left[2\pi \frac{V}{V_\pi} \sin \left(\frac{2D - L}{\lambda_m} \right) \right] \sin \left(\omega_m t - \frac{2\pi D + \pi L}{\lambda_m} \right) \left. \right\}.$$

Решение таких выражений известно посредством функций Бесселя:

$$I/I_0 = \left\{ 1 + \cos \left(\varphi_2 - \varphi_1 + \frac{2\pi L}{\lambda_0} \right) \cdot J_0 \left[2\pi \frac{U}{U_\pi} \sin \left(\frac{2\pi D - \pi L}{\lambda_m} \right) \right] \right\} + \\ + 2J_1 \left[2\pi \frac{U}{U_\pi} \sin \left(\frac{2\pi D - \pi L}{\lambda_m} \right) \right] \sin \left(\varphi_2 - \varphi_1 + \frac{2\pi L}{\lambda_0} \right) \times \\ \times \sin \left(\omega_m t - \frac{2\pi D + \pi L}{\lambda_m} \right) \left. \right\}, \quad (8)$$

где J_1 и J_0 — функции Бесселя нулевого и первого порядков.

Полученное выражение (8) показывает, что источники Λ_1 и Λ_2 должны быть синхронизированы, т. е. $\varphi_2 - \varphi_1 = 0$. Это означает, что для построения светодальномера должен применяться один источник света, световой поток которого следует разделить на две равные части.

Разность оптических путей потоков L является средством выбора рабочей точки модуляционной характеристики. При $L = n \frac{\lambda_0}{2}$ где $n = 0, 1, 2, \dots$, выражение (8) упростится и примет вид

$$I/I_0 = 2 \left[1 + J_0 \left(2\pi \frac{U}{U_\pi} \sin \frac{2\pi D}{\lambda_m} \right) \right]. \quad (9)$$

Из (9) видно, что интенсивность света на фотоприемнике имеет постоянную составляющую, зависящую от измеряемого расстояния с периодичностью $\lambda_m/2$. При $L = n \frac{\lambda_0}{2} + \frac{\lambda_0}{4}$ интенсивность света

содержит основную частоту модуляции ω_m и амплитуда ее зависит от измеряемого расстояния

$$\frac{\tilde{I}}{I_0} = 2 \left\{ 1 + 2J_1 \left[2\pi \frac{U}{U_\pi} \sin \frac{\pi}{\lambda_m} (2D - L) \right] \cdot \sin \left[\omega_m t - \frac{\pi}{\lambda_m} (2D - L) \right] \right\}. \quad (10)$$

Здесь величину L , как бесконечно малую по сравнению с D , можно опустить.

Из (9) и (10) следует, что при работе с изменением постоянной составляющей можно применять любой фотоприемник и наблюдать глазом, а при работе на изменении амплитуды переменной составляющей обычная регистрация покажет среднее значение интенсивности, которая будет равна половине суммарной интенсивности света, не зависящей от измеряемого расстояния. В этом случае необходим фотоприемник, восстанавливающий частоту модуляции, или же обычный фотоприемник необходимо поместить в СВЧ-резонатор и выполнить преобразование частоты. Амплитуда сигнала на выходе таких устройств при 100% модуляции будет изменяться от 0 до $I/I_0 = 4$ (рис. 3).

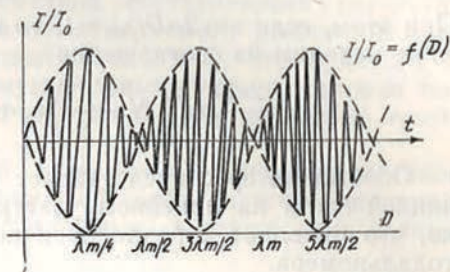


Рис. 3. График результирующей интенсивности света на экране фотоприемника.

Таким образом, подбором величины L решается вопрос выбора точки на модуляционной характеристике, что при поляризационной модуляции потребовало бы применения фазовой пластинки либо приложения на кристалле постоянного напряжения.

Для всех построенных светодальномеров с поляризационной модуляцией света зависимость выходной интенсивности света от расстояния определяем соотношением

$$I/I_0 = \frac{1}{2} \left[1 - J_0 \left(2\pi \frac{U}{U_\pi} \cos \frac{2\pi D}{\lambda_m} \right) \right]. \quad (11)$$

Из сопоставления выражения (11) с (9) видно, что различия заключаются в распределении интенсивности света, максимум которого при равных источниках света значительно больше для фазовой модуляции. Это в свою очередь позволяет, пользуясь светодальномерами, построенными на фазовой модуляции, существенно увеличить дальность измеряемых расстояний при прочих равных условиях.

Амплитудное положение минимумов света зависит от режима питания модулятора, оптимальное значение которого определяем

из условия максимума отрицательного значения функции Бесселя J_1 :

$$J_1 \left(2\pi \frac{U}{U_\pi} \sin \frac{2\pi D}{\lambda_m} \right) = -0,4027594,$$

имеющего место при аргументе

$$2\pi \frac{U}{U_\pi} \sin \frac{2\pi D}{\lambda_m} = 3,832.$$

При этом, если $\sin 2\pi D/\lambda_m = 1$, то $U/U_\pi = 0,6$, а измеряемое расстояние находим из соотношения

$$\frac{2\pi D}{\lambda_m} = \left(N - \frac{1}{2} \right) \pi, \text{ и } D = N \frac{\lambda_m}{2} - \frac{\lambda_m}{4}.$$

Особый интерес представляет работа светодальномера с модуляцией света на линейном участке модуляционной характеристики, что приводит к реализации потенциальной точности СВЧ-светодальномера.

Из (10) следует, что амплитуда основной частоты модуляции зависит от режима работы модулятора и измеряемого расстояния.

При отсутствии модуляции, т. е. когда $U/U_\pi = 0$, выходная интенсивность света равна сумме интенсивностей двух потоков, т. е. $I/I_0 = 2$.

С увеличением напряжения на кристалле, в зависимости от измеряемого расстояния, появится амплитуда основной частоты с периодами, колеблющимися относительно уровня $I/I_0 = 2$. Максимальная амплитуда будет при максимуме функции Бесселя первого порядка J_1 , входящей в уравнение (10):

$$J_1 \left[2\pi \frac{U}{U_\pi} \sin \frac{\pi}{\lambda_m} (2D - L) \right] = 0,58.$$

Это имеет место при значении аргумента 1,841, из чего находим как оптимальный режим питания модулятора, так и значение измеряемого расстояния

$$\sin \frac{2\pi}{\lambda_m} (2D - L) = 1, \quad \frac{\pi}{\lambda_m} (2D - L) = \left(N - \frac{1}{2} \right) \pi.$$

Поскольку $L = \frac{n \cdot \lambda_0}{2} + \frac{\lambda_0}{4}$, то его значение по сравнению с λ_m можно опустить, считая, что фазовая ошибка на волне λ_m намного больше, чем величина L . В этом случае

$$D = N \frac{\lambda_m}{2} - \frac{\lambda_m}{4}, \quad (12)$$

т. е. при работе на линейном участке модуляционной характеристики имеет место сдвиг фазы на величину $\frac{\lambda_m}{4}$.

Таким образом, практическая реализация фазового способа модуляции позволяет построить светодалномер для измерения ломаных в произвольных плоскостях линий. Так как в процессе измерений электрический вектор световой волны не находится в плоскости отклоняющего зеркала, то лучи обоих световых пучков деполаризуются в равной степени по одному и тому же закону, а поскольку конечный результат измерений зависит лишь от разности фаз лучей, влияние отклоняющего зеркала на работу системы исключается.

Изменение амплитуды переменной составляющей результирующего сигнала в зависимости от измеряемого расстояния происходит в соответствии с функцией Бесселя J_1 , что приводит в свою очередь к тому, что минимум результирующего сигнала наступает с большой крутизной. Это в 2—3 раза повышает чувствительность системы.

Равенство оптических путей разделенных световых потоков приводит к взаимной компенсации фазовых сдвигов, вносимых показателем преломления, его функциями, а также оптическими элементами.

1. Гюнашян К. С., Илясов В. В. Оптическая линия задержки для светодалномеров с поляризационной модуляцией света // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1985. Вып. 2. С. 104—110. 2. Гюнашян К. С., Гарибян Р. З., Чирков Л. Е., Абгарян Л. А. Способ измерения расстояний. А. с. № 905 646 // Бюл. изобрет. 1982. № 6. 3. Гюнашян К. С., Илясов В. В., Чирков Л. Е., Айрапетян Е. А. Электрооптический способ измерения расстояний. А. с. № 1 080 012 // Бюл. изобрет. 1984. № 10. 4. Костецкая Я. М. Свето- и радиодальномеры. Львов, 1986. 5. Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Методы модуляции и сканирования света. М., 1970.