

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВИБРИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СО СВЕТО- ВОЗВРАЩАЮЩИМ ПОКРЫТИЕМ

Проведено обоснование связи параметров рассеянного лазерного излучения с соответствующими пространственными параметрами движения отражающей поверхности со световозвращающим покрытием. Результаты свидетельствуют о возможности создания различного вида лазерных приборов вибрационного контроля

Г.Н. Доля

Доктор технических наук, профессор*
Контактный тел.: (0572) 67-31-44
E-mail:dolya@onet.com.ua

Е.С. Чудовская

Аспирант*

*Кафедра теоретической и прикладной системотехники
Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина
пл. Свободы, 6, г. Харьков, Украина, 61077
Контактный тел.: (057) 775-12-34
E-mail: hudovskaya@gmail.com

А.В. Кочин

Кандидат технических наук
Метрологический центр военных эталонов Вооруженных Сил
Украины
ул. Полтавский шлях, 195, Харьков, Украина, 61034
Контактный тел.: (057) 731-97-70
E-mail: akochin@ukr.net

Постановка задачи, анализ литературы

Вибродиагностика как одно из направлений технической диагностики широко используется для определения технического состояния самого разнообразного электромеханического оборудования. Она используется в авиации, в системах контроля турбоагрегатов и

паровых турбин на электростанциях, при производстве и эксплуатации различного оборудования с высокими требованиями к качеству изготовления. Экономическая эффективность применения вибродиагностики определяется возможностью обнаружения дефектов на ранних этапах их развития с определением локализации конкретных дефектных узлов и деталей.

Лазерные приборы вибрационного контроля имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными контактными виброизмерителями /1/. Прежде всего, это возможность дистанционного контроля вибраций, локальность измерения, обусловленная возможностью фокусировки лазерного луча, оперативность измерения, ограниченная лишь временем изменения направления излучения и т.д.

Однако метод прямого отодетектирования, используемый для измерения угловых колебаний объектов с шероховатой поверхностью /2/, имеет ограничения по дальности действия в связи с малой мощностью принимаемого сигнала. Добиться существенного повышения отношения сигнал/шум можно за счет использования ветовозвращающих покрытий (ретрорефлекторов) на поверхности вибрирующих объектов. экспериментальные макеты, основанные на этом принципе, описаны в /3,4/. Однако до сих пор в литературе отсутствует теоретическое обоснование связи параметров рассеянного лазерного излучения с соответствующими параметрами движения поверхности. Решению данного вопроса и посвящена данная статья.

Основная часть

Как известно, существующие в настоящее время покрытия основаны на использовании либо микростеклошариков, либо микропризм /5/. Микростеклошарики имеют случайные размеры и хаотически расположены на поверхности. Диаграмма вторичного рассеяния в этом случае имеет хаотическую («спекл») структуру и описывается лишь с использованием статистических методов.

При использовании микропризм характер расположения их на поверхности носит етерминированный регулярный характер в соответствии с гексагональной симметрией.

В этом случае для описания характера рассеяния лазерного излучения на такой поверхности возможно использование аппарата теории ифракции.

Поверхность СВП можно рассматривать как своеобразную двумерную дифракционную решетку с соответствующим расположением «прозрачных» и «непрозрачных» элементов.

Для простоты анализа будем рассматривать одномерную решетку, при этом более общие результаты для двумерного случая будут получены в результате математического моделирования.

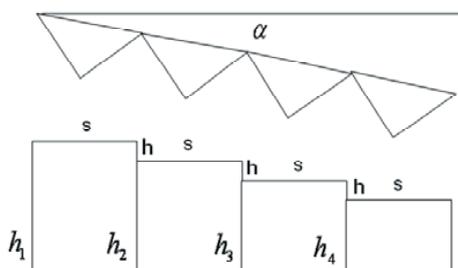


Рисунок 1

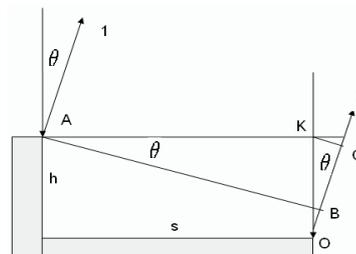


Рисунок 2.

Можно показать, что если участок поверхности содержит N световозвращающих элементов (рис.1), то плоский волновой фронт разбивается на N фрагментов, в каждом из которых будет иметь место общая для всех парциальных лучей задержка, величина которой определяется расстоянием от конкретного элемента до вершины угла α .

От одного элемента к другому оптическая длина пути меняется дискретно на величину $2h$, где h – разность расстояний от вершин прямоугольного треугольника до горизонтальной линии, принятой за положение поверхности при отсутствии угловых колебаний поверхности. Тогда можно полагать, что совокупность ветовозвращателей с точки зрения характера и результата отражения света эквивалентна совокупности плоских зеркальных отражательных элементов, пространственное расположение которых представлено в нижней части рис.1.

Анализируя это обстоятельство, можно обратить внимание, что оптический блок на рис.1 представляет собой не что иное, как хорошо известный в теории дифракции отражающий эшелон Майкельсона /6,7/. Используем для описания закономерностей интересующего нас углового расположения локальных максимумов подход, описанный в /6/.

Рассмотрим нормальное падение лучей на эшелон (рис.2). Оценим разность хода δ лучей 1 и 2, отраженных от соответствующих участков эшелона, и дифрагирующих под углом θ к вертикали.

Из рис.2 следует, что $\delta = KO + OB$. (1)

Величина OB в свою очередь определяется очевидным соотношением

$$OB = OC - CB. \quad (2)$$

Тогда в принятых обозначениях

$$\delta = h + h \cos \theta - s \sin \theta. \quad (3)$$

Угловые положения локальных максимумов определяются из условия $\delta = m\lambda$, где m определяет порядок дифракции, λ – длина волны излучения.

Угловое положение нулевого максимума определяется из условия $m = 0$. В реальных условиях зондирования наблюдаемые локальные максимумы отраженного лазерного излучения сосредоточены в пределах единиц градусов. Ограничиваясь поэтому условием $\theta \ll 1$, будем пренебрегать слагаемыми второго порядка малости и с учетом этого получим $2h = \theta_0 s$, где h – высота элемента эшелета, s – его длина.

Принимая во внимание, что $h/s = \tan \alpha = \alpha$, окончательно получим

$$\theta_0 = 2\alpha \quad (4)$$

Это условие имеет простой физический смысл и говорит о том, что угловое положение локального мак-

симула при отклонении наклонной поверхности на угол α определяется законом зеркального отражения (4). Очевидно, что характер дифракционной картины не зависит от смещений поверхности вдоль и поперек падающего луча, так как фазовые соотношения, определяющие угловое положение локальных максимумов не меняются, а будет зависеть лишь от величины наклона поверхности.

Угловое положение первого локального максимума можно определить из условия $m = 1$. Т.е. $\lambda = 2h - s\theta_1$. Откуда $\theta_1 = 2\alpha - \lambda/s = 2\alpha(1 - \lambda/2h)$

И в случае $h \gg \lambda$ имеем $\theta_1 = 2\alpha$

Рассуждая аналогично можно получить для произвольного m

$$\theta_m = 2\alpha$$

Для исследования влияния параметров смещения двумерной поверхности со СВП на характеристики рассеянного излучения было проведено математическое моделирование с использованием аппарата БПФ.

Расчет распределения интенсивности лазерного излучения в плоскости наблюдения можно произвести с использованием известного приближения Фраунгофера:

$$U_{\text{набл}}(x_0, y_0) = \iint_{\infty} U_{\text{отр}}(x_1, y_1) \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda z} (x_0 x_1 + y_0 y_1)\right] dx_1 dy_1, \quad (5)$$

$$U_{\text{отр}}^*(x_1, y_1) = U_{\text{над}}(x_1, y_1) \times T_{\text{СВП}}(x_1, y_1), \quad (6)$$

где λ – длина волны, $U_{\text{набл}}(x_0, y_0)$ – амплитудно-фазовое распределение (комплексная амплитуда поля) в плоскости наблюдения (рис.3) в точке с координатами (x_0, y_0) , $U_{\text{отр}}^*(x_1, y_1)$ – комплексная амплитуда поля, отраженного от СВП, z – расстояние от плоскости СВП до плоскости наблюдения.

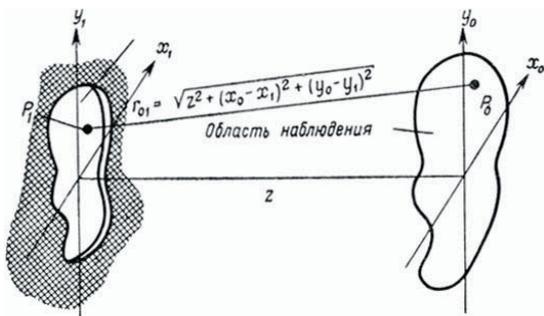


Рисунок 3.

Комплексную амплитуду падающего на СВП поля (в фокальной перетяжке) определим как гауссоиду, которая определяется формулой

$$U_{\text{над}}(x_1, y_1) = U_0 \exp\left(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{2w^2}\right), \quad (7)$$

где w – радиус гауссоиды.

Коэффициент отражения СВП

$T_{\text{СВП}}(x_1, y_1) = T(x_1, y_1) \exp^{i\varphi}$ будем моделировать двумя множителями. Первый множитель $T(x_1, y_1) = 1$ в пределах отражающей ячейки (светлые участки на рис.4) и $T(x_1, y_1) = 0$ вне ячейки (темные участки на рис.4). Множитель $\exp^{i\varphi}$ определяет набег фазы в

каждом элементе СВП за счет наклона поверхности (см. рис.1)

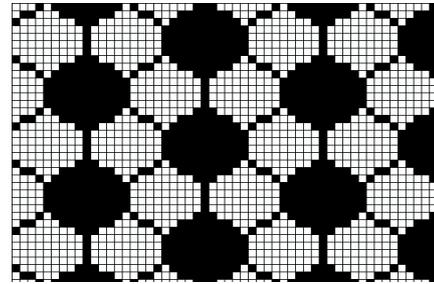


Рисунок 4.

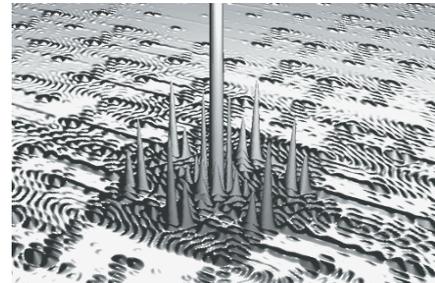


Рисунок 5.

Таким образом, при известном амплитудно-фазовом распределении в области излучения (7), используя (5, 6) можно найти комплексную амплитуду поля $U_{\text{набл}}(x_0, y_0)$ и соответственно распределение интенсивности излучения $I(x_0, y_0) = |U_{\text{набл}}(x_0, y_0)|^2$ в плоскости наблюдения (рис.5).

Заметим, что интеграл в формуле (5) может быть вычислен с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Для этого в среде Delphi 7 была написана процедура вычисления БПФ, на вход которой подавался квадратный массив размером 2048×2048 элементов (комплексных чисел), задаваемый по формуле (7). На выходе процедуры формировалось распределение $U_{\text{набл}}(x_0, y_0)$ и, соответственно $I(x_0, y_0)$.

По мере изменения наклона СВП по каждой из осей x и y рассчитывалось угловое положение нулевого максимума. Результаты расчетов представлены графиками на рис.6. По оси абсцисс отложены значения наклона СВП в радианах, по оси ординат – значения угловых смещений максимума в радианах.

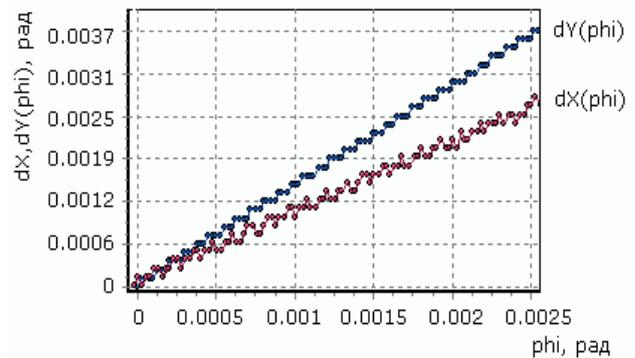


Рисунок 6.

Как видно из графиков, сдвиг максимума линейно зависит от наклона СВП по одной из координат, причём наклон по X приводит к сдвигу максимума только по X. Та же картина наблюдается и для направления Y. Этот вывод соответствует результатам теоретического анализа для одномерного случая, проведенного выше.

Кроме того, моделировалось вращение СВП относительно оси падающего луча. В результате чего было отмечено адекватное вращение диаграммы рассеяния излучения относительно положения нулевого максимума (рис.5).

Данное обстоятельство может быть положено в основу построения различного вида датчиков угловых вибраций объектов со товозвращающими покрытиями. Например, выявленные закономерности использовались в датчиках, описанных в /3,4/. Особенностью их работы являлось использование одноканального приемника излучения, что не позволяло разделять вибрации во взаимно ортогональных областях. Поэтому в /8/ было предложено использование телевизионного приемника для анализа рассеянного излучения (т.е. для анализа характера изменения изображения, представленного на рис.5), который лишен указанных недостатков. Очевидно, указанные варианты измерителей угловых вибраций объектов не являются исчерпывающими, а возможны также и другие варианты их построения.

Выводы

1. Показано, что характер дифракции света на эквивалентном СВП эшелоне Майкельсона подобен закономерностям зеркального отражения, а характеризующимся простой линейной зависимостью углового отклонения произвольного локального максимума от углового положения наклона поверхности. Последнее обстоятельство является основой для разработки и создания различного вида лазерных вибродатчиков.

2. В результате математического моделирования показано, что при дифракции света на двумерной поверхности со СВП, угловые колебания последней при-

водят к линейному изменению углового положения локальных максимумов в рассеянном лазерном излучении. Радиальные и поперечные смещения поверхности не изменяют картину дифракции, а вращение поверхности относительно оси падающего луча приводят к адекватным поворотам диаграммы рассеянного излучения.

Литература

1. Застрогин Ю.Ф. и др. Лазерные приборы вибрационного контроля и точного позиционирования. – М.: Машиностроение, 1995. – 315с.
2. Пресняков Ю.П., Щепинов В.П. Использование спекл-эффекта для анализа колебаний шероховатой поверхности. // Журнал технической физики №8, том 67, – М., 1997. – С.71-75.
3. Доля Г.Н., Кочин А.В., Якименко С.Н., Живчук В.Л. Измерение параметров вибраций объектов со ветоотражающими покрытиями методом прямого тодетектирования. Сборник научных трудов ХВУ, вып № 1(39), 2002, с.102-104.
4. G. N. Dolya, V. Zhyvchuk The appreciation of the influence of exactness of focusing on the work of the laser homodyne method of measuring the parameters of vibration.Proc.SPIE. Vol.5582 p. 45-52, Sep 2004 .
5. Государственный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р12.4.026-2001. Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная.
6. Дитчберн Р. Физическая оптика – М.: Наука. Главн. ред. физико-математической литературы. 1965, – 631с.
7. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука. Главн. ред. физико-математической литературы, 1973, – 720с.
8. Доля Г.Н., Живчук В.Л., Трикоз М.В. Оценка потенциальной точности измерений двулучевого лазерного вибрметра телевизионного типа. Збірник наукових праць «Вісник Харківського національного університету ім.В.Н.Каразіна» №646. Серія «Радіофізика та електроніка» вип. №2. Харків, 2004, с.32-36.