

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХВОЛНОВОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ В АВТОРЕФЛЕКСИОННОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ СМЕЩЕНИЙ

© 2009 г. К. Г. Араканцев; А. Н. Тимофеев, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий,
механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: oeps@grv.ifmo.ru

Рассматривается двухволновый метод измерений, позволяющий уменьшить влияние градиента температуры воздушного тракта на результат измерения смещения объекта с помощью авторефлексионной оптико-электронной системы.

Коды OCIS: 080.2710, 120.0280.

Поступила в редакцию 02.06.2008.

В настоящее время для высокоточного измерения линейных поперечных смещений объектов важную роль играют оптико-электронные системы (ОЭС). При контроле смещений частей объектов элементы наблюдения зачастую рассредоточены в пространстве и находятся на удалении от устройства контроля и управления, а излучение оптической головки распространяется в приземном слое открытой атмосферы. В этих условиях, как показывает теоретический анализ, среди внешних источников погрешностей наибольшее влияние на точность измерений оказывает рефракция воздушного тракта, зависящая от длины волны излучения, температуры, давления и влажности воздуха [1]. Из этих параметров наибольшее воздействие оказывает изменение температуры. Многоволновые методы компенсации влияния атмосферы позволяют повысить точность оптических измерений [2].

На кафедре оптико-электронных приборов и систем СПбГУ ИТМО разработана авторефлексионная ОЭС, предназначенная для измерения смещений при центрировке турбоагрегатов. Линейные смещения контрольного элемента (КЭ) (трипель-призма), закрепляемого с помощью стандартного приспособления в контролируемой расточке, измеряются в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Применение специальных решений в оптической и электронных схемах позволяет производить измерения на дистанциях от 0,5 до 20 м. Данные измерений обрабатываются компьютером по специальной программе в автоматическом режиме. Диапазон измерения смещений по вертикали – ± 6 мм, по горизонтали – ± 4 мм с погрешностью не более 0,09 мм (погрешность измерений приведена для серии измерений, имеющей 30 отсчетов, проведенных в лабораторных условиях). В рабочих условиях значение вертикального градиента температуры воздушного тракта может достигать 10 К/м.

Реализация в такой системе двухволнового метода измерений позволила бы снизить влияние регулярной рефракции на точность измерений. Этот метод заключается в измерениях координат объекта с использованием излучений двух длин волн (основной и вспомогательной). При этом на основе полученных данных можно внести поправку в результат измерения смещения объекта [3].

При отсутствии в воздушном тракте градиента температуры вертикальное смещение объекта с оптической оси объектива можно рассчитать по формуле (1)

$$Y_1 = [b(y'_{21} + y'_{11})] / [4(y'_{21} - y'_{11})], \quad (1)$$

где y'_{11} , y'_{21} – вертикальные координаты изображений первого и второго излучающих диодов, измеренные на основной длине волны, мм; b – расстояние между излучающими диодами в вертикальной плоскости, мм.

Предположим теперь, что на участке l_2 (рис. 1) дистанции L в вертикальном направлении действует постоянный стабильный и равномерный градиент температуры $\text{grad}_y T$.

Из соотношений геометрической оптики, а также выражений, описывающих распространение луча в среде с градиентом показателя преломления (вызванным градиентом температуры воздушного тракта), была получена формула, позволяющая рассчитать вертикальное смещение КЭ с учетом действия регулярной рефракции

$$Y_{1g} = [b(y'_{21g} + y'_{11g})] / [4(y'_{21g} - y'_{11g})] - [\tan(\alpha_{1g})/4] [(a'b)/(y'_{21g} - y'_{11g}) + 2(l_1 - l_3 - c) + d + \Delta_{pl}]. \quad (2)$$

Здесь y'_{11g} , y'_{21g} – вертикальные координаты изображений первого и второго излучающих диодов, из-

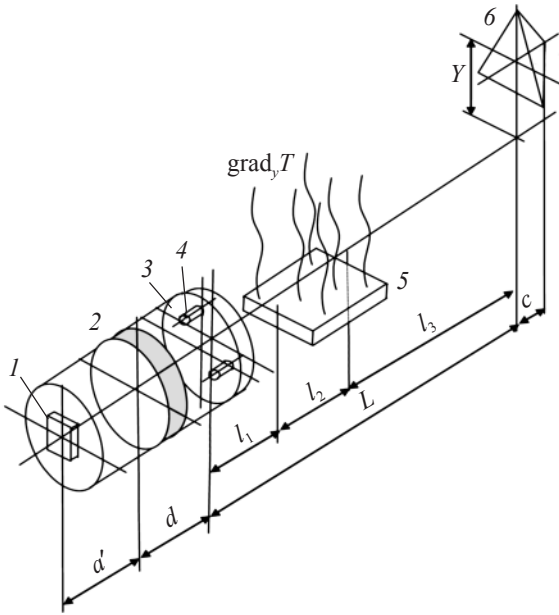


Рис. 1. Авторефлексионная ОЭС с вертикальным градиентом температуры, действующим на участке воздушного тракта. 1 – ПЗС матрица, 2 – объектив, 3 – защитное стекло, 4 – двухцветные излучающие диоды, 5 – источник вертикального градиента температуры, 6 – КЭ.

меренные на основной длине волны, мм; l_1, l_3 – отрезки, обозначенные на рис. 1, мм; α_{1g} – угол отклонения от оптической оси объектива на участке l_2 луча основной длины волны, вошедшего на этот участок воздушного тракта параллельно оптической оси объектива (рис. 2); a' – задний отрезок объектива, мм; d – расстояние от передней главной плоскости объектива до плоскости, в которой размещены излучающие площадки диодов, мм; Δ_p – удлинение, вносимое трипельпризмой на основной длине волны, мм; c – размер трипельпризмы вдоль оптической оси объектива, мм.

Из сравнения формул (1) и (2) видно, что ошибка в определении Y из-за действия в системе $\text{grad}_y T$ составит

$$\Delta_1 = -\left[\tan(\alpha_{1g})/4 \right] \left[(a'b)/(y'_{21g} - y'_{11g}) + 2(l_1 - l_3 - c) + d + \Delta_{p1} \right]. \quad (3)$$

Чтобы произвести вычисление вертикального смещения КЭ по формуле (2), необходимо определить величину $\tan(\alpha_{1g})$. Из теоретических положений, изложенных в [4], легко получить, что

$$\tan(\alpha_{1g}) = -l_2 \text{grad}_y T [(n_1 - 1)/T], \quad (4)$$

где n_1 – средний показатель преломления атмосферы для излучения основной длины волны; T – сред-

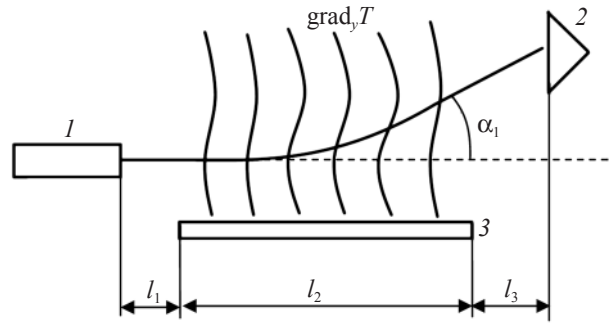


Рис. 2. К выводу формулы для определения вертикального смещения КЭ в условиях действия на участке воздушного тракта стабильного вертикального градиента температуры. 1 – излучающая головка системы, 2 – КЭ, 3 – источник вертикального градиента температуры.

няя температура атмосферы, K ; $\text{grad}_y T$ – вертикальный градиент температуры, действующий на участке l_2 воздушного тракта. Для определения $\text{grad}_y T$ может быть использован двухволновый метод измерений, при котором после измерения Y на основной длине волны производится измерение Y на вспомогательной длине волны. В случае измерения Y с использованием излучения вспомогательной длины волны

$$\Delta_2 = -\left[\tan(\alpha_{2g})/4 \right] \left[(a'b)/(y'_{22g} - y'_{12g}) + 2(l_1 - l_3 - c) + d + \Delta_{p2} \right], \quad (5)$$

при этом

$$\tan(\alpha_{2g}) = -l_2 \text{grad}_y T [(n_2 - 1)/T], \quad (6)$$

где n_2 – средний показатель преломления атмосферы для излучения вспомогательной длины волны.

Поскольку $\text{grad}_y T$ изначально не известен, при измерениях на обеих длинах волн расчет Y производится по формуле (1). Разность полученных значений будет равна разности ошибок Δ_2 и Δ_1 (7)

$$\Delta Y_{12} = \Delta_2 - \Delta_1. \quad (7)$$

Из формул (3), (4) и (5) можно получить выражение (8) для $\text{grad}_y T$ – температурного градиента воздушного тракта, действующего в системе, и по формуле (9) рассчитать скорректированное с учетом действия регулярной рефракции значение вертикального смещения КЭ.

$$\text{grad}_y T = \Delta Y_{12} / (A_2 - A_1), \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned}
A_1 &= l_2 (n_1 - 1) \left[(a'b) / (y'_{21g} - y'_{11g}) + 2(l_1 - l_3 - c) + d + \Delta_{p1} \right] / (4T), \\
A_2 &= l_2 (n_2 - 1) \left[(a'b) / (y'_{22g} - y'_{12g}) + 2(l_1 - l_3 - c) + d + \Delta_{p2} \right] / (4T), \\
Y_{1g} &= \left[b(y'_{21g} + y'_{11g}) \right] / \left[4(y'_{21g} - y'_{11g}) \right] - (\Delta Y_{12} A_1) / (A_1 - A_2).
\end{aligned} \tag{9}$$

На рис. 3 показан макет авторефлексионной ОЭС, в которой реализован двухволновый метод измерений [5].

Анализ формулы (7) показал, что для регистрации малых значений вертикального градиента температуры в воздушном тракте системы необходимо оптимальным образом выбрать параметры системы. А именно:

- использовать объектив с максимально возможным размером заднего отрезка a' (в данной системе $a' = 250$ мм),
- использовать ПЗС матрицу высокого разрешения и большого формата (SONY ICX255AL с разрешением 752×582),
- максимально увеличить разность показателей преломления n_1 и n_2 ; при этом выбранные длины волн, на которых излучают диоды, должны быть согласованы со спектральной чувствительностью ПЗС матрицы (для рассматриваемой системы указанным требованиям удовлетворяют диоды, излучающие на длинах волн $\lambda_1 = 940$ нм, $\lambda_2 = 430$ нм),



Рис. 3. Общий вид авторефлексионной ОЭС. 1 – центральный блок обработки информации, 2 – блок предварительной обработки информации, 3 – блок управления светодиодами, 4 – излучающая головка, 5 – приемная оптическая головка.

– выбрать максимально возможную дистанцию измерений ($L = 20$ м).

Предложена следующая методика двухволнового метода измерений:

- измерение вертикального смещения КЭ Y_1 на основной длине волны,
- измерение вертикального смещения КЭ Y_2 на вспомогательной длине волны,
- вычисление по формуле (7) дисперсионной разности ΔY_{12} ,
- вычисление по формуле (8) значения вертикального градиента температуры воздушного тракта $\text{grad}_y T$,
- вычисление по формуле (9) скорректированного значения вертикального смещения КЭ, измеренного на основной длине волны.

Справедливость предложенной методики предлагается проверить, используя в качестве модели стабильного вертикального градиента температуры оптический клин, внесенный в ход лучей на одном из участков воздушного тракта. Известно, что действие градиента температуры на участке воздушного тракта эквивалентно действию оптического клина, внесенного в ход лучей на этом участке. Это подтверждается тем, что формула (10) для вычисления скорректированного с учетом действия клина вертикального смещения КЭ аналогична формуле (2)

$$Y_{1c} = \left[b(y'_{21c} + y'_{11c}) \right] / \left[4(y'_{21c} - y'_{11c}) \right] - \left[\tan(\alpha_{1c}) / 4 \right] \times \left[(a'b) / (y'_{21c} - y'_{11c}) + 2l_{1c} - d + \Delta_{p1} \right], \tag{10}$$

где $\alpha_{1c} = \sigma(n_{1c} - 1)$ – угол отклонения клина, σ – преломляющий угол клина, n_{1c} – показатель преломления клина для излучения основной длины волны, l_{1c} – расстояние от Излучающей головки (ИГ) до клина вдоль оптической оси объектива, мм.

Чтобы использовать оптический клин при исследовании двухволнового метода измерений в авторефлексионной ОЭС, необходимо определить параметры клина (показатели преломления материала клина для излучения основной и вспомогательной длин волн, преломляющий угол). Первоначально необходимо задаться значением предполагаемого градиента температуры $\text{grad}_y T$, который будет действовать в системе, протяженностью участка дей-

ствия градиента и по формулам (4) и (6) рассчитать углы отклонения клина для излучения основной и вспомогательной длин волн. Затем, задав материал клина, который обладает максимально возможной дисперсией, по формуле

$$\sigma = \alpha_{1c}/(n_{1c} - 1) \text{ или } \sigma = \alpha_{2c}/(n_{2c} - 1)$$

рассчитывается преломляющий угол клина. Для того, чтобы выбранный клин был полностью эквивалентен действующему в системе градиенту температуры, необходимо правильно выбрать место расположения клина вдоль оптической оси. Выражение для определения места положения клина рассчитывается по формуле

$$l_{1c} = l_1 + l_2/2. \quad (11)$$

Данная методика позволяет моделировать градиент температуры не только на участке, но и на всем протяжении воздушного тракта, что является очень ценным при значительных трудностях в создании протяженного градиента температуры в лабораторных условиях.

С целью проверки предложенной методики был проведен эксперимент, в котором использовался оптический клин из стекла К8 со следующими параметрами: показатели преломления для основной ($\lambda_1 = 940$ нм) и вспомогательной ($\lambda_2 = 430$ нм) длин волн $n_1 = 1,530425$ и $n_2 = 1,508557$ соответственно, преломляющий угол клина $\sigma = 0,64^\circ$.

Клин размещался вплотную к объективу ИГ. КЭ находился на дистанции 7000 мм от ИГ. При измерениях с использованием диодов, излучающих на основной длине волны, погрешность от действия клина составила 20,2 мм. При измерениях на вспомогательной длине волны – 18,6 мм. Дисперсионная разность ΔY_{12} составила 1,6 мм. Используя формулы, аналогичные формулам (8) и (9) для градиента температуры, был рассчитан преломляющий угол используемого клина. Значение составило $0,72^\circ$. Вычисленное значение поправки, которую нужно внести в результат измерений, сделанных на основной длине волны, составило 25,1 мм. Использование двухволнового метода в рассмотренном эксперименте уменьшило влияние оптического клина на результат измерения положения КЭ, что позволяет сделать вывод о возможности применения данного метода и в целях борьбы с воздействием вертикального градиента температуры.

Основные результаты исследования

В рамках теоретического исследования была обоснована возможность и целесообразность применения в авторефлексионных ОЭС двухволнового ме-

тода с целью уменьшения погрешности измерений от стабильного вертикального градиента температуры воздушного тракта. Указанный метод измерений был реализован в макете авторефлексионной ОЭС контроля поперечных линейных смещений объектов. Экспериментальное исследование, в котором стабильный вертикальный градиент температуры моделировался с помощью оптического клина, подтвердило правильность теоретических положений.

Заключение

Дистанционные измерения линейных смещений объектов требуют применения методов, позволяющих учитывать влияние атмосферы на точность измерений. Одним из наиболее влияющих факторов, приводящих к значительной систематической погрешности измерений, является градиент температуры воздушного тракта. В данной работе приведено теоретическое обоснование целесообразности и экспериментальное подтверждение возможности использования двухволнового метода с целью уменьшения влияния градиента температуры воздушного тракта на точность измерений линейных смещений объектов. В качестве модели стабильного вертикального градиента температуры был использован оптический клин. В дальнейшем планируются углубленные экспериментальные исследования двухволнового метода измерений с использованием нагревательного элемента, устанавливаемого на одном из участков воздушного тракта.

Исследование проводится в рамках гранта РФФИ 06-08-00356 (№ г.р. 01.2.007 00968).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Неумывакин Ю.К.* Автоматизация геодезических измерений в мелиоративном строительстве. М.: Недра, 1984. 126 с.
2. *Араканцев К.Г.* Ослабление влияния вертикального градиента температуры воздушного тракта на погрешность измерения положения объекта // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49. № 8. С. 38–42.
3. *Прилепин М.Т., Голубев А.Н.* Оптические квантовые генераторы в геодезических измерениях. М.: Недра, 1972. 168 с.
4. *Сытник В.С.* Лазерные геодезические приборы в строительстве. М.: Стройиздат, 1988. 165 с.
5. *Крайлюк А.Д., Краснящих А.В., Мусяков В.Л., Тимофеев А.Н., Ярышев С.Н.* Оптико-электронная система контроля положения центра корпусных деталей турбоагрегатов относительно оптической оси // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46. № 8. С. 61–63.