НИВЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТИЧНОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТОДИОДОВ НА ПАРАМЕТРЫ АВТОКОЛЛИМАЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ УГЛА СКРУЧИВАНИЯ

И.Л. Ловчий
АО «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения»
г. Сосновый Бор, lovchy@niioep.ru

Описывается деструктивное влияние частичной когерентности излучения источников засветки марки на работу автоколлимационного измерителя угла скручивания. Обсуждается механизм возникновения интерференционных эффектов. Для повышения стабильности показаний прибора предложен и реализован согласованный подбор параметров марки и контрольного отражательного элемента.

В высокоточном автоколлимационном измерителе угла скручивания [1] в качестве контрольного отражательного элемента (КОЭ) используется составной набор двугранных 90° уголковых отражателей. Разворот такого КОЭ вокруг оси, перпендикулярной плоскости ребер, приводит к двойному развороту изображения марки в плоскости регистров приемника. Применение марки в виде прозрачного щелевого растра и приемника в виде двух разнесенных параллельных ПЗС-линеек позволяет реализовать алгоритм измерения угла скручивания по величине «разбегания» видеосигналов на регистрах приемника.

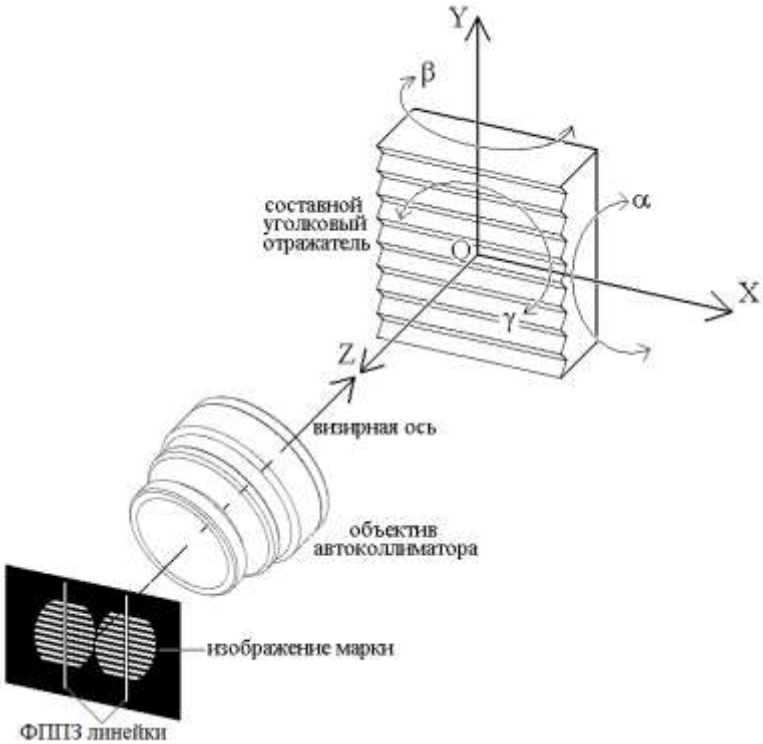

Рис. 1. Схема направлений и расположения элементов угломера

На рис. 1 представлена условная схема угломера с указанием направления визирной оси, расположения регистров приемника, проекции марки в плоскости регистров и составного отражателя с осями наклона по углу α, разворота по углу β и вращения по углу скручивания γ. Марка угломера состоит из параллельных штрихов шириной $T/2$, расположенных с периодом T. Для получения равномерной освещенности марки используются два параллельных осветительных канала, раздельно засвечивающие ПЗС-линейки (в дальнейшем видеосигналы с первой линейки условно отнесем к первому каналу, со второй – ко второму каналу).

Фокусное расстояние телеобъектива F, шаг ребер КОЭ l. В качестве приемника используется ФППЗ с двумя чувствительными регистрами, разнесенных на расстояние 12,5 мм.

Типичная предельная погрешность измерения угла скручивания угломером составляет несколько угловых секунд. Однако при ортогональном положении визирной оси автоколлиматора к плоскости ребер КОЭ стабильность работы некоторых угломеров

нарушалась - были выявлены случаи увеличения ошибки измерений в несколько раз. Это проявлялось в варьировании результатов измерений угла скручивания при очень малых, порядка нескольких угловых секунд, изменениях наклона отражателя («микронаклонах») при общем наклоне не более ± (10′ ÷ 15′) относительно вертикали. Наблюдения видеосигналов на экране осциллографа показали, что при $|\alpha| > 15'$ форма видеосигналов в цугах практически синусоидальная. При $|\alpha| < 10'$ на несколько подряд идущих видеосигналов (~ 5 ÷ 6 шт.) накладывались периодические мелкомасштабные биения с колоколообразной огибающей, причем максимальным искажениям были подвергнуты фронты видеоимпульсов, а верхушки и впадины цуга импульсов оставались практически без изменений. При монотонном наклоне отражателя область искажений равномерно передвигалась по цугу видеосигналов, «отслеживая» наклон. В зависимости от положения граней КОЭ относительно пятна засветки на цуге видеосигналов могла появиться вторая зона искажений, отстоящая от первой, также равномерно передвигавшаяся по цугу при наклоне отражателя. Замена одного КОЭ на другой приводила к небольшому смещению границ диапазонов искажений, не меняя общий характер картины. Отметим, что при засветке одного двугранного отражателя КОЭ (с экранированием остальных) искажения видеосигналов отсутствовали при любых наклонах КОЭ.

Наличие искажений видеосигналов при нормальном положении КОЭ (ортогональном относительно визирной оси автоколлиматора) характерно для всех исследованных приборов, однако часть приборов практически не реагировала на факт искажений (погрешность измерения угла скручивания не увеличивалась), реакция других зависела от конкретных величин углов наклона и скручивания и от положения пятна засветки относительно ребер КОЭ. Такая ситуация была обусловлена критерием взаимной фазировки искажений видеосигналов между каналами, поскольку измеренная величина угла скручивания пропорциональна разности сумм координат фронтов видеосигналов по каналам.

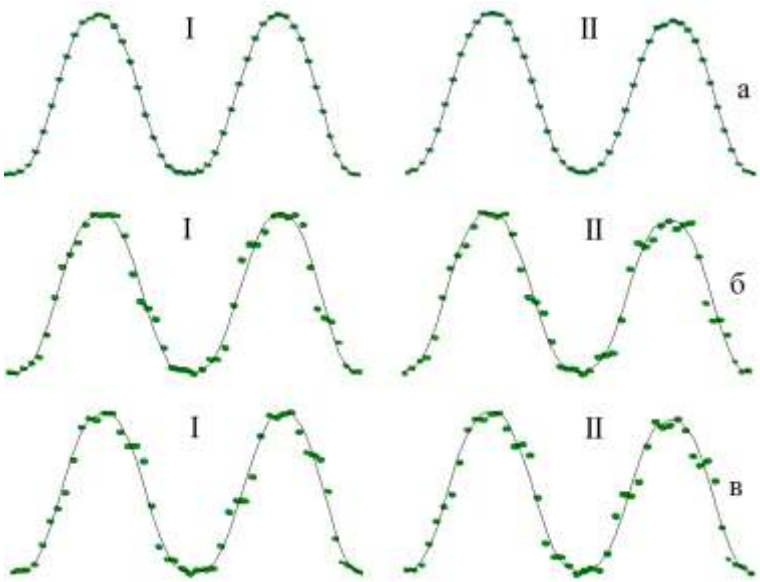

Рис. 2. а - видеосигналы без искажений; б, в – видеосигналы с искажениями (смещение фронтов по полувысоте влево (б) и вправо (в)).

В качестве примера на рисунке 2 представлены формы двух видеосигналов в цугах первого и второго каналов (точки отражают уровни засветки отдельных пикселей ПЗС-линейки) в зависимости от величины угла α для фиксированного угла $\gamma = 50''$ (снимки с экрана осциллографа, конкретные значения угла не являются типичными, а выбраны по факту для одного из приборов, чувствительных к «эффекту микронаклонов»). Видеосигналы рисунка 2,а - без искажений, получены при угле наклона КОЭ $\alpha \sim 12'$ и используются для интерполяционного построения реперных кривых. Видеосигналы рисунков 2,б и 2,в соответствуют углам наклона КОЭ $\alpha \sim 3'$ с разницей $\sim 5''$.

Как видно из рисунков 2,б и 2,в искажения видеосигналов синфазны по каналам (сдвиги фронтов видеосигналов по полувысоте относительно реперных кривых направлены в каналах в одну и ту же сторону), поэтому результаты измерения угла скручивания отличаются незначительно ($\gamma_{изм} = 49''$ и $\gamma_{изм} = 51''$, соответственно).

На рисунке 3 представлены формы тех же видеосигналов для фиксированного угла $\gamma = 380''$.

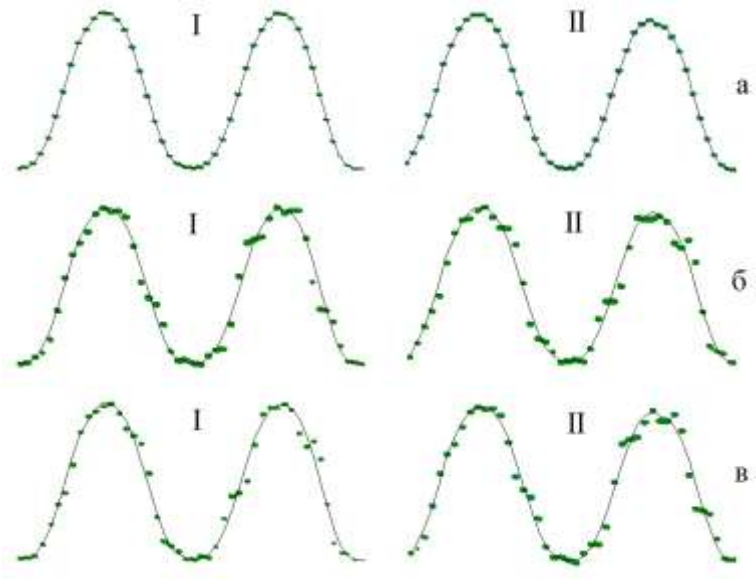

Рис. 3. а - видеосигналы без искажений; б, в – видеосигналы с искажениями (смещение фронтов импульсов по каналам в разные стороны).

Видеосигналы рисунка 3,а - без искажений, получены при угле наклона КОЭ $\alpha \sim 12'$. Видеосигналы рисунков 3,б и 3,в соответствуют углам наклона КОЭ $\alpha \sim 3'$ с разницей $\sim 5''$. Искажения видеосигналов рисунка 3,б и рисунка 3,в находятся по каналам в противофазе (сдвиги фронтов видеосигналов относительно реперных кривых направлены в разные стороны), поэтому результаты измерения угла скручивания отличаются ($\gamma_{изм} = 373''$ и $\gamma_{изм} = 384''$, соответственно). Заметим, что в реальном приборе видеосигналы с регистров приемника фильтруются, и сдвиги фронтов отфильтрованных импульсов становятся существенно меньше, но тем не менее достаточными для искажения результатов измерения угла скручивания.

Появление искажений видеоимпульсов при ортогональном положении визирной оси автоколлиматора к плоскости ребер отражателя обусловлено реальной, хотя и достаточно малой когерентностью излучения светодиодов, используемых для засветки марки. Типичная полуширина $\delta\lambda$ спектра излучения используемых в автоколлиматоре светодиодов ($\lambda = 0{,}87$ мкм) составляет $\delta\lambda \approx 40$ нм, что соответствует длине продольной когерентности света $l_{ког} = \lambda^2/\delta\lambda$
≈ 19 мкм. Разность хода между пучками света, отраженными от двух соседних двугранных 90° уголковых отражателей КОЭ, наклоненного относительно визирной оси автоколлиматора на угол α, составляет $\Delta = 2l\sin\alpha$. Тогда при выполнении условия:

$$\Delta \le l_{ког} \qquad \text{или} \qquad |\alpha| \le \arcsin(l_{ког}/2l) \tag{1}$$

эти пучки могут интерферировать между собой с характерным угловым периодом ϑ проявления «эффекта микронаклонов»:

$$\vartheta = \arcsin(\lambda/2l). \tag{2}$$

При длине продольной когерентности $l_{ког} \approx 19$ мкм максимальные углы наклона отражателя относительно направления падающего излучения, при которых может иметь место интерференция пучков от одного точечного источника, составляют в нашем случае $\alpha \sim \pm 3{,}3'$, что соответствует колоколообразному охвату интерференционными биениями шести подряд идущих видеосигналов из десяти в цуге. С учетом углового размера марки поперек штрихов $\approx 10'$, общий диапазон наклонов отражателя, при которых будут иметь место искажения (появление искажений на одном крае цуга видеосигналов, прохождение области искажений через весь цуг и пропадание их на другом его крае) составит $\sim 16'$, что качественно согласуется с результатами наблюдений.

Уровни искажений и расположения зон искажений зависят от параметров и «чистоты» изготовления КОЭ (шаг l, отклонения от прямоугольности двугранных отражателей, отклонения от упорядоченности набора двугранных отражателей в составе КОЭ) и от положения пятна засветки относительно ребер отражателя. В ситуации, когда одно из внешних ребер (выступ) делит пятно пополам, подавляющая часть излучения падает на два

соседних двугранных отражателя. В этом случае наблюдается одна область искажений на цуге видеосигналов. При центральном положении одного из внутренних ребер (впадина) относительно пятна засветки основная часть излучения охватывает три двугранных отражателя, и интерференционные биения могут быть вызваны взаимодействием уже трех пучков.

На рис. 4 для прибора, чувствительного к «эффекту микронаклонов», представлена зависимость результатов измерения угла скручивания от угла наклона КОЭ при положении плоскости ребер отражателя, близком к ортогональному относительно визирной оси угломера.

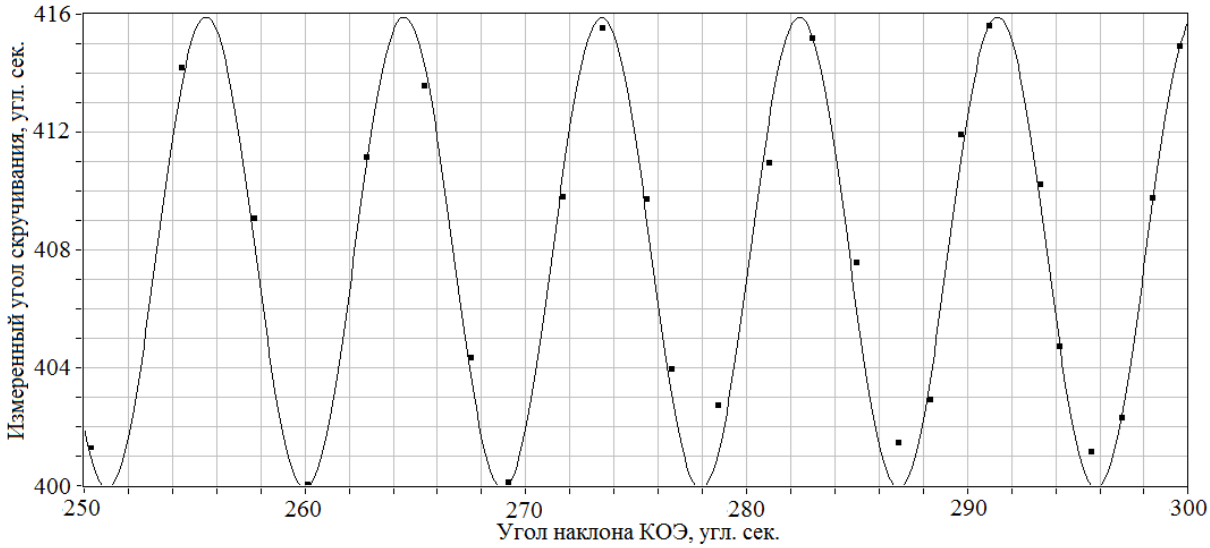

Рис. 4. Вариации результатов измерения угла скручивания при наклоне КОЭ для прибора, чувствительного к «эффекту микронаклонов».

Экспериментальные точки хорошо накладываются на синусоидальную кривую с периодом $\vartheta \approx 9''$, что согласуется с условием (2) при шаге отражателя l = 10 мм. Для сравнения, для этого же прибора при наклоне КОЭ на угол ± 12′ и более вариации результатов измерения не превышали ± 1″.

Условия, при которых сдвиги фронтов искаженных видеосигналов одного канала компенсируются или, наоборот, складываются со сдвигами фронтов видеосигналов другого канала, приводя к некорректному результату вычисления угла скручивания, зависят от комбинации многих факторов (возможны небольшие вариации оптических трактов каналов, спектральных характеристик светодиодов, пространственных параметров марки, фокусного расстояния объектива, параметров КОЭ и т.п.) и в общем случае представляются трудно прогнозируемыми, а значит – и неуправляемыми. Поэтому для независимости результатов измерений от условий корреляции искажений между каналами необходим согласованный подбор параметров марки и КОЭ для компенсаций биений в парах соседних видеосигналов в каждом канале. Другими словами, если на два пространственных периода изображения щелевой структуры марки накладывается нечетное число периодов интерференционных биений, то сдвиги фронтов четных искаженных видеосигналов будут в значительной степени компенсироваться сдвигами фронтов нечетных видеосигналов, тем самым нивелируя изменения суммы положений фронтов.

При λ = 0,87 мкм, T = 300 мкм, l = 10 мм и варьировании величины F от 980 мм до 1013 мм (типичный разброс измеренных фокусных расстояний реальных объективов) отношение $2Tl/\lambda F$ меняется от 6,81 до 7,04 при наиболее неблагоприятной - с точки зрения влияния искажений на результаты измерений угла скручивания - величине 7,0. Уменьшив период марки до T = 280 мкм (ширина штриха 140 мкм) получим диапазон изменения $2Tl/\lambda F$ от 6,35 до 6,57 при наиболее благоприятной - для компенсации искажений - величине 6,5.

Реализация такой корректировки на практике позволила существенно повысить стабильность точностных параметров описанных выше угломеров, практически исключив факты заметного влияния «эффекта микронаклонов» на результаты измерения угла скручивания.

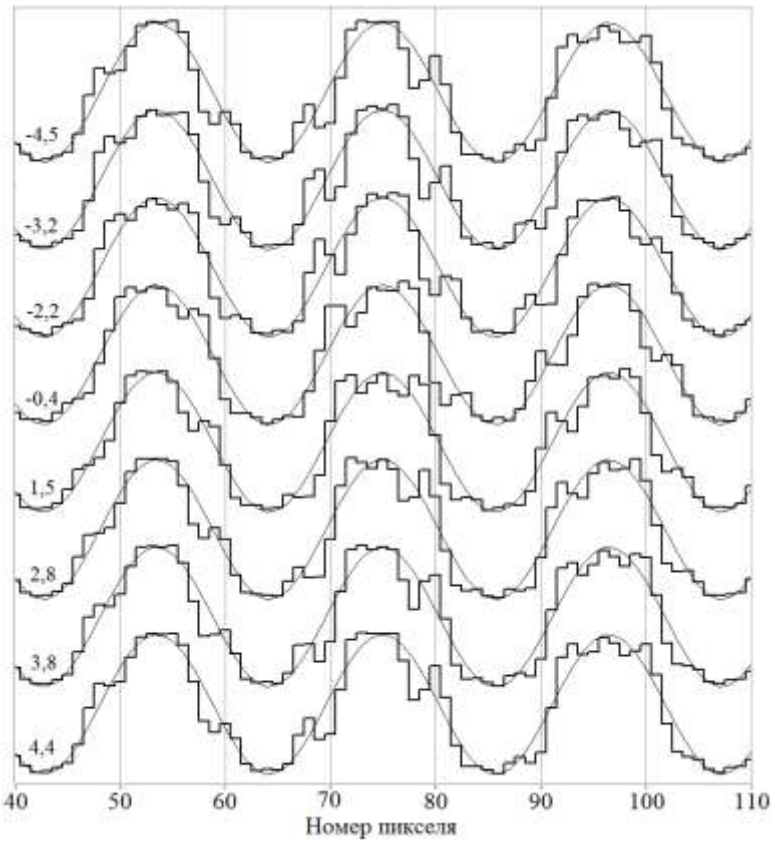

Рис. 5. Наложение со сдвигом по вертикали фрагментов восьми кадров.

На рис. 5 для угломера с корректированной маркой представлено наложение оцифрованных фрагментов видеосигналов из трех видеоимпульсов, наиболее подверженных искажениям, для относительных углов наклона КОЭ от -4,5″ до +4,4″ (величина угла указана слева для каждого фрагмента). Реперные синусоидальные кривые представляют собой интерполяцию сигналов без искажений. Из рисунка видно, что первый и последний фрагменты практически совпадают между собой. С учетом измеренного максимума спектральной кривой излучения светодиода в канале λ = 0,864 мкм разница углов наклона КОЭ в 8,9″ для верхнего и нижнего фрагментов хорошо согласуется с выражением (2).

Фрагменты рисунка можно использовать для качественной интерпретации механизма нивелирования влияния «микронаклонов» - компенсации сдвигов фронтов в парах видеосигналов. Так, обозначая цифрами -1, +1 и 0 направления видимых сдвигов фронтов (по полувысоте) «влево», «вправо» и «без сдвига» относительно реперных кривых, получим для угла наклона -4,5″ ориентировочную комбинацию (-1, +1, 0), для угла -3,2″ – (-1, 0, +1), для угла -2,2″ – (0, -1, +1), для угла -0,4″ – (+1, -1, 0), для угла 1,5″ – (+1, 0, -1), для угла 2,8″ – (0, +1, -1), для углов 3,8″ и 4,4″ – (-1, +1, 0). Для некоторых фрагментов комбинации не совсем «контрастны», но с учетом «веса» каждого сдвига их суммы остаются практически постоянными, т.е. не зависящими от угла наклона КОЭ.

Таким образом, в работе представлена интерпретация механизма влияния частичной когерентности излучения светодиодов на результаты измерения угла скручивания автоколлимационным угломером с контрольным отражательным элементом в виде составного набора двугранных 90° уголковых отражателей. Согласованный подбор параметров марки и отражателей позволяет значительно нивелировать это влияние.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Жуков Ю.П., Ловчий И.Л., Петров Л.П., Пестов Ю.И., Чудаков Ю.И., Шевцов И.В.* Высокоточное устройство для измерения угла скручивания // Оптический журнал, 2014, т. 81, № 9, с. 69 – 72.