

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В КОД С АВТОКОРРЕКЦИЕЙ ПОГРЕШНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ, ВЫЗВАННОЙ БИЕНИЯМИ КОДИРУЮЩЕЙ ШКАЛЫ

© 2007 М. С. Рощупкин, П. Л. Токмак, Г. И. Леонович

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассмотрена математическая модель кодирующего сопряжения оптоэлектронного цифрового преобразователя перемещения, учитывающая воздействие внешних дестабилизирующих факторов. Перечислены основные дефекты оптомеханического узла и показано влияние таких факторов на функцию отклика преобразователя. Показан пример визуализации информации о влиянии виброударных воздействий на погрешность функции отклика при различных амплитудах виброколебаний. Проведены расчеты погрешности и дана ее оценка при введении автокоррекции, показывающая адекватность данной модели и эффективность введения автокоррекции.

Одним из направлений в создании оптоэлектронных цифровых преобразователей перемещения (ОЦПП) для летательных и космических аппаратов является существенное уменьшение габаритов оптомеханического узла (ОМУ). Вместе с тем, с увеличением разрешающей способности и уменьшением рабочей зоны кодирующих шкал (КШ) доминирующий характер приобретает погрешность преобразования, вызываемая дифракцией света на отверстиях КШ оптического излучения [1-3]. Линеаризация функции отклика на этапе калибровки не дает ожидаемого эффекта из-за того, что в процессе эксплуатации на ОМУ воздействуют внешние дестабилизирующие факторы (ВДФ), которые вызывают нестабильность пространственного положения КШ в промежутке между излучателем и считывающими элементами. При этом наибольший вклад в эту нестабильность вносят виброударные воздействия (ВУВ) в широком спектре частот и амплитуд. Поскольку параметры ВУВ носят случайный характер, то для коррекции этой доминирующей составляющей погрешности преобразования одним из наиболее эффективных методов является метод вспомогательных измерений. При этом для конкретного типа ОМУ необходимо измерять текущее значение расстояния между КШ и источником излучения, а также учитывать функциональную зависимость погрешности функции отклика от этого расстояния.

Структурная схема ОЦПП с автокоррекцией погрешности преобразования, вызванной биениями кодирующей шкалы, показана на рисунке 1. Кодирующая шкала (КШ) 3 выполнена в виде жесткой непрозрачной пластины, в которой по определенной закономерности вырезаны отверстия. Период a_0 следования и ширина отверстий определяются, исходя из величины диапазона Q измерения и заданной чувствительности da измерителя. Два фотоприемника (ФП) 4 облучаются от источника излучения 1 через фокон 2 и перемещающуюся КШ.

На выходе первого ФП формируются счетные импульсы, а на выходе второго ФП - импульсы управления. Определение направления перемещения и реверсивный счет импульсов производится управляемым реверсивным счетчиком 5. Чувствительность такого ОЦПП ограничена количеством отверстий на единицу перемещения: $N=Q/a_0$, а точность - инструментальными погрешностями выполнения КШ и считывающих профилей чувствительных поверхностей фотоприемников. При увеличении количества элементов КШ на единицу измеряемой величины рост разрешающей способности может сопровождаться резким увеличением технологических затрат и падением точности вследствие влияния оптических потерь - дифракции и рассеяния света, а также усиления влияния ВДФ. Добиться увеличения разрешающей способности без особого усложнения ОМУ можно

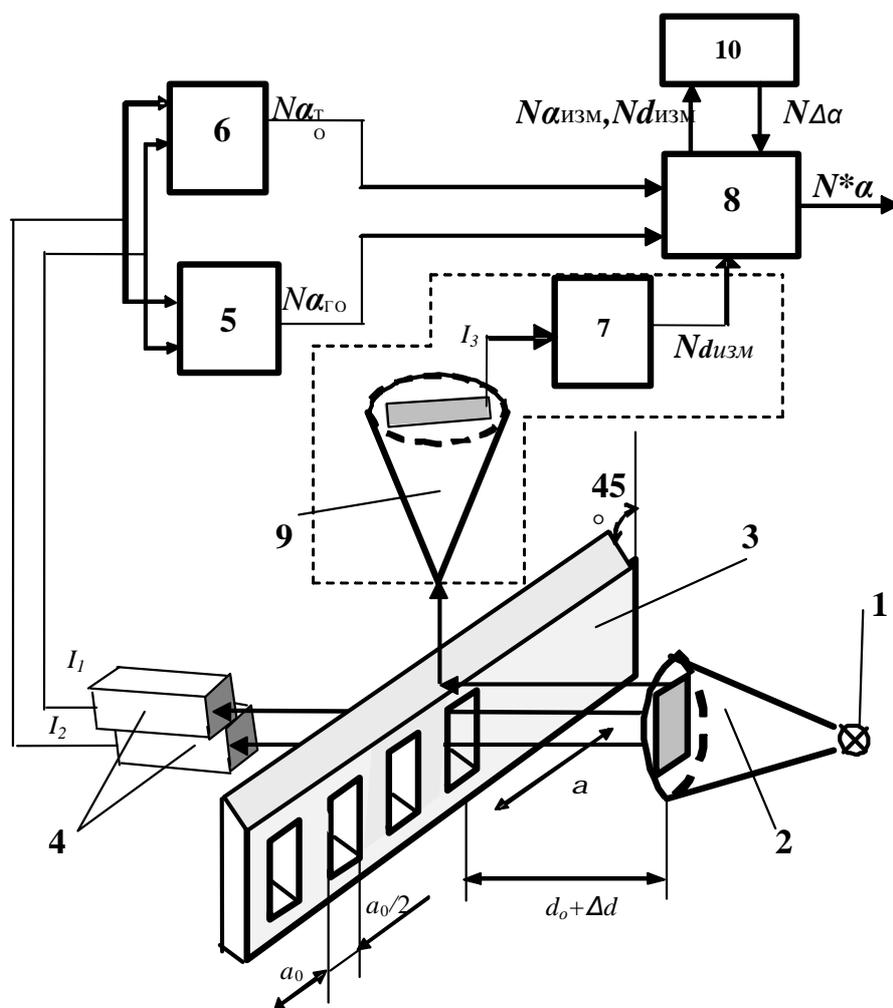


Рис. 1. Двухотсчетный преобразователь перемещения шкалы в код с автокоррекцией

введением второго отсчета. В качестве интерполируемого параметра выбирается амплитуда или пространственная фаза оптического сигнала. Информационная емкость такого ОЦПП равна

$$n = \log_2 \left(\frac{Q}{a_0} \right) + \log_2 \left(\frac{a_0}{da} \right) \quad (1)$$

где da - разрешающая способность канала второго отсчета.

ФП выполнены с профилированной чувствительной поверхностью, размеры которой равны размерам отверстий КШ и находятся между собой на расстоянии $a_0(k+1/4)$, где $k=0, 1, 2, 3, \dots$

С выхода КШ снимается промодулированный световой поток, который направляется на ФП. Каждый из ФП формирует функцию отклика, пропорциональную линейному перемещению КШ. С выходов ФП сигнала

через соответствующие преобразователи напряжения в код (ПНК) 5 и 6 поступают в арифметико-логическое устройство (АЛУ) 8, которое формирует выходной код перемещения. Код содержит шкалу грубого отсчета, соответствующую суммарному количеству отверстий КШ, отсчитанных от линии считывания. Код точного отсчета получается путем квантования в ПНК функции отклика от единичного отверстия. Для устранения неоднозначности кодирования в диапазоне ТО, связанного с симметричностью информационного сигнала, используется управляющий сигнал от второго фотоприемника.

Для оценки дифракционной погрешности преобразования была разработана математическая модель кодирующего сопряжения, построенная в соответствии с рисунком 2.

Реальные геометрические размеры окон младших разрядных дорожек шкалы в двухотсчетных ОЦПП соизмеримы с расстояни-

ем от КШ до считывающего элемента (СчЭ) и намного больше нижней границы l_n спектра излучения.

Комплексная амплитуда U_p волны в точке P наблюдения (рис. 2):

$$U_p = \int_P \frac{kU(x, y, z)}{2\pi i R} e^{ikR} df_n, \quad (2)$$

где $R = \sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z-z)^2}$, X, Y, Z - координаты точки p наблюдения на плоскости P считывания, x, y, z - координаты точек волновой поверхности;

$-\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}$,

$-\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2}$, $z = 0$;

$U(x, y, z)$ - амплитуда световой волны на одном из отверстий шкалы, через которое проходит световой поток;

df_n - проекция элемента площади волновой поверхности на плоскость, перпендикулярную направлению волнового вектора k .

Если считать, что $U = U_0 = \text{const}$ и $Z = d$ (плоская волна падает нормально к

плоскости отверстия КШ), то имеет место дифракция Френеля, и амплитуда дифрагированной волны имеет вид

$$U_p = \frac{kU_0}{2\pi i} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \frac{\exp\left(ik\sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + d^2}\right)}{\sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + d^2}} dydx. \quad (3)$$

Интенсивность света на поверхности считывающего элемента можно записать в следующем виде [3]:

$$I_p(x, y, d) \equiv |U_p(x, y, d)|^2 = \frac{U_0^2}{4} \left\{ [C(\hat{X}_+) + C(\hat{X}_-)]^2 + [S(\hat{X}_+) + S(\hat{X}_-)]^2 \right\} \times \left\{ [C(\hat{Y}_+) + C(\hat{Y}_-)]^2 + [S(\hat{Y}_+) + S(\hat{Y}_-)]^2 \right\},$$

где $C(v) = \int_0^v \cos\left(\frac{pt^2}{2}\right) dt$, $S(v) = \int_0^v \sin\left(\frac{pt^2}{2}\right) dt$ -

интегралы Френеля.

Функция отклика (ФО) $H(X_d)$ СчЭ определяется соотношением

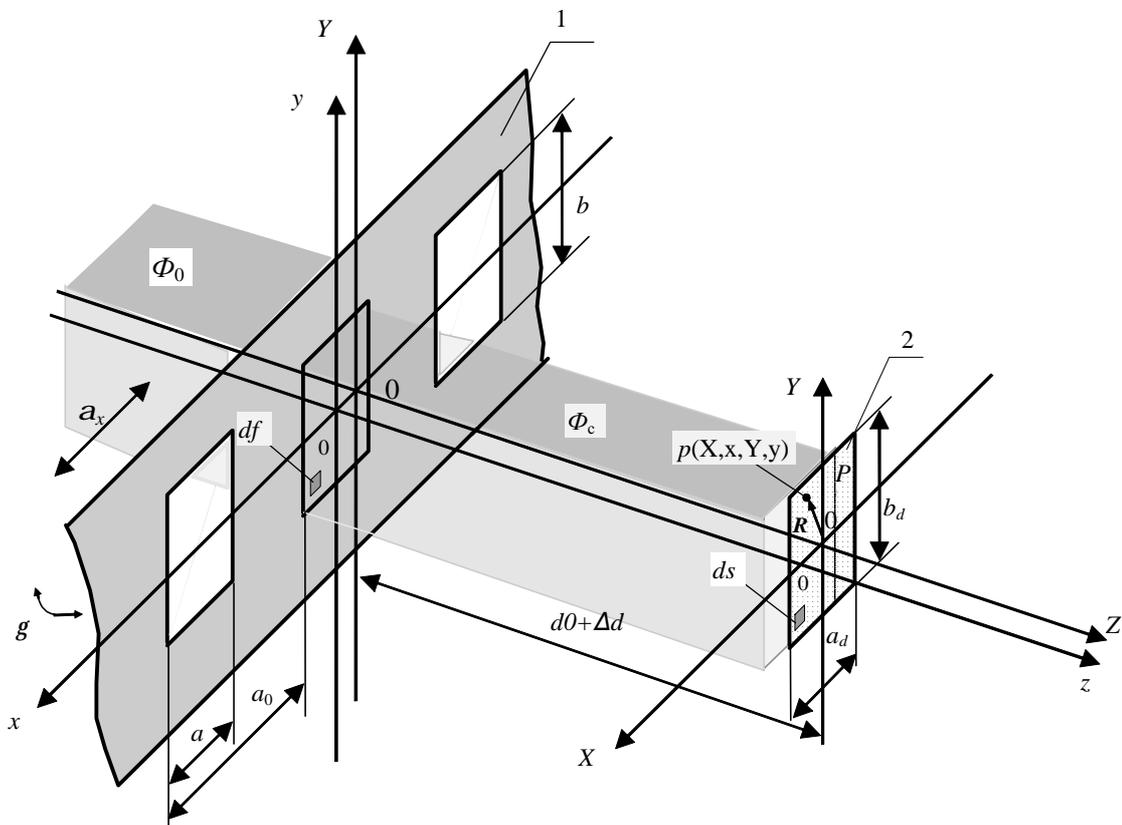


Рис. 2. Схема прохождения параллельного светового пучка через кодирующее сопряжение ОЦПП

$$H(X_d) = \int_{sd} j(X, Y) \cdot I_p(X, Y, Z) ds_n, \quad (4)$$

где $j(X, Y)$ - функция распределения относительной чувствительности фотоприемника по считывающей поверхности; ds_n - проекция элемента площади СчЭ ds на плоскость, нормальную к направлению падения светового луча.

Дифракционные погрешности преобразования вызываются наличием фиксированного расстояния d_0 и дополнительных случайных вибрационных перемещений Δd КШ между источником излучения (ИИ) и фотоприемным устройством.

Оценка погрешности, вызванной дифракционными явлениями при виброударном воздействии, была произведена с помощью разработанной авторами «Автоматизированной системы моделирования функции отклика ОЦПП АСМФО». Программа позволяет моделировать функцию отклика в двухотсчетном ОЦПП с учетом волнового характера света, инструментальных и методических погрешностей ОМУ для различных параметров отверстий КШ в условиях воздействия ВДФ.

На рисунке 3 показан пример визуализации информации о влиянии виброударных воздействий на погрешность ФО при различных амплитудах d виброколебаний и равномерном перемещении кодирующей шкалы относительно СчЭ. Из графиков видно, что погрешность имеет нелинейный характер, а диапазон ее изменения варьируется в зависимости от значения d : с ростом d увеличивается диапазон изменения погрешности ФО. При приближении КШ к СчЭ наблюдается уменьшение амплитуд осцилляций. Однако для надежного функционирования ОМУ расстояние d^* между КШ и СчЭ обычно выбирается из соотношения

$$d^* = d_0 \geq 2\Delta d_{\max}. \quad (5)$$

В ходе проведенного вычислительного эксперимента были получены значения относительной погрешности, вызванной торцевыми биениями КШ. Для 16-разрядного преобразователя перемещения в диапазоне 0...5 см ее максимальное значение составило около 15 % (потеря точности составляет 2...4 разряда). Это доказывает, что такую погреш-

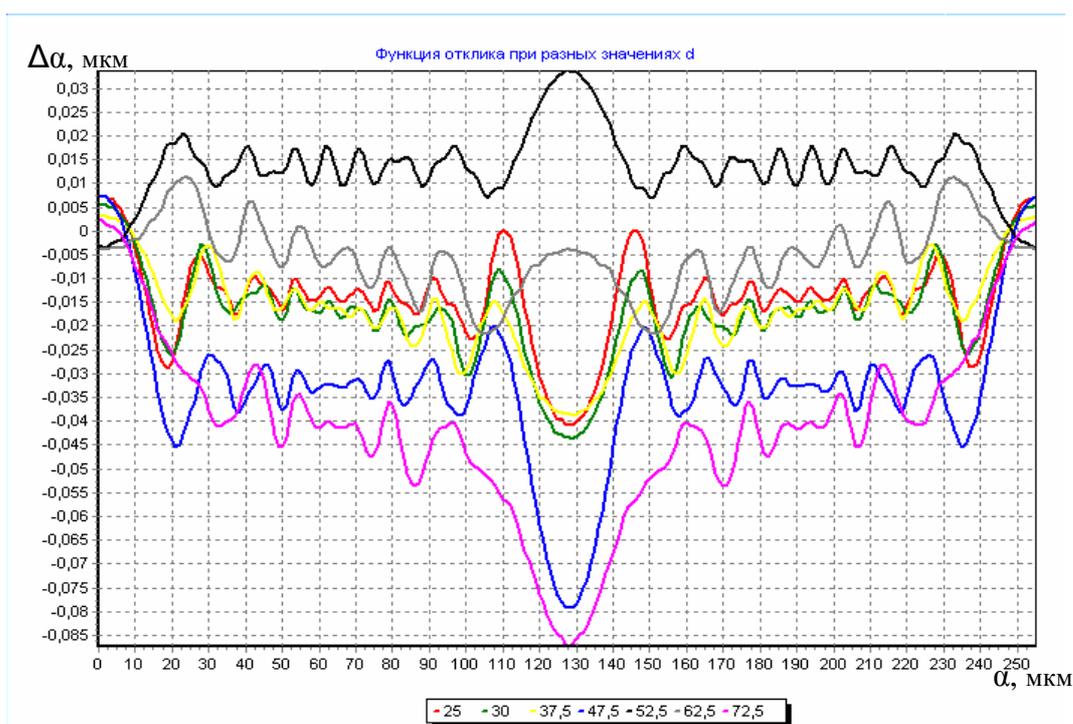


Рис. 3. Зависимость погрешности $\Delta\alpha$ от перемещения α при фиксированных значениях расстояния d между КШ и ИИ

ность необходимо учитывать и компенсировать при работе ОЦПП в жестких условиях эксплуатации. Для реализации схемы автоматической коррекции погрешности преобразования методом вспомогательных измерений в ОЦПП был введен дополнительный измеритель расстояния между КШ и источником излучения (ИИ) и реализован алгоритм ввода полученных на этапе калибровки поправок в код перемещения. Значения поправок вносятся в виде двумерной матрицы по параметру перемещения и смещения КШ в память микропроцессора (МП).

На рисунке 1 пунктирной линией обозначена соответствующая надстройка. Часть излучения от источника падает на верхнюю часть КШ, имеющей по краю фаску со скосом в 45° , и, отражаясь, попадает на фокон 9. Фокон, подключенный по коллимирующей схеме, производит считывание светового луча, отраженного от КШ, и направляет его на фоточувствительный слой, нанесенный на выходной торец фокона. Далее в ПНК 7 сигнал с выхода фоточувствительного слоя преобразуется в код N_d , который поступает в АЛУ. Устройство в зависимости от значений

N_d и N_a формирует адрес в виде двумерной матрицы и считывает из постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) 10 поправку $\Delta N_a(N_d, N_a)$ к значению кода перемещения:

$$N_a^* = N_a + \Delta N_a(N_d, N_a). \quad (6)$$

На рисунке 4 изображен трехмерный график зависимости погрешности Δa ФО от перемещения a и расстояния d между КШ и ИИ, который после оцифровки вносится в виде матрицы поправок в ПЗУ МП.

С помощью АСМФО были проведены расчеты погрешности и ее оценка при введении автокоррекции. Максимальное значение погрешности Δa без (линия 1) и с введением (линия 2) коррекции показаны на рисунке 5. При оцифровке параметра d в 128 позициях относительная погрешность снижается до 2% (точность 2 мкм), что позволяет считать, что цель коррекции (достижение заданной точности преобразования) достигнута.

Список литературы

1. Леонович Г. И. Оптоэлектронные цифровые датчики перемещений для жест-

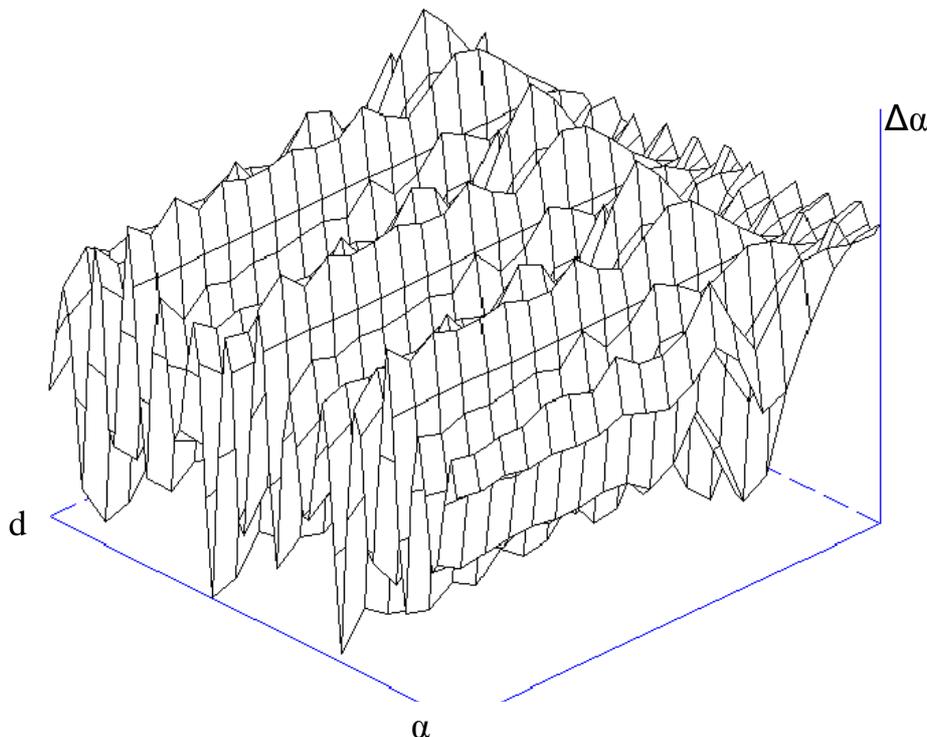


Рис. 4. График зависимости погрешности Δa от расстояния d и от перемещения a

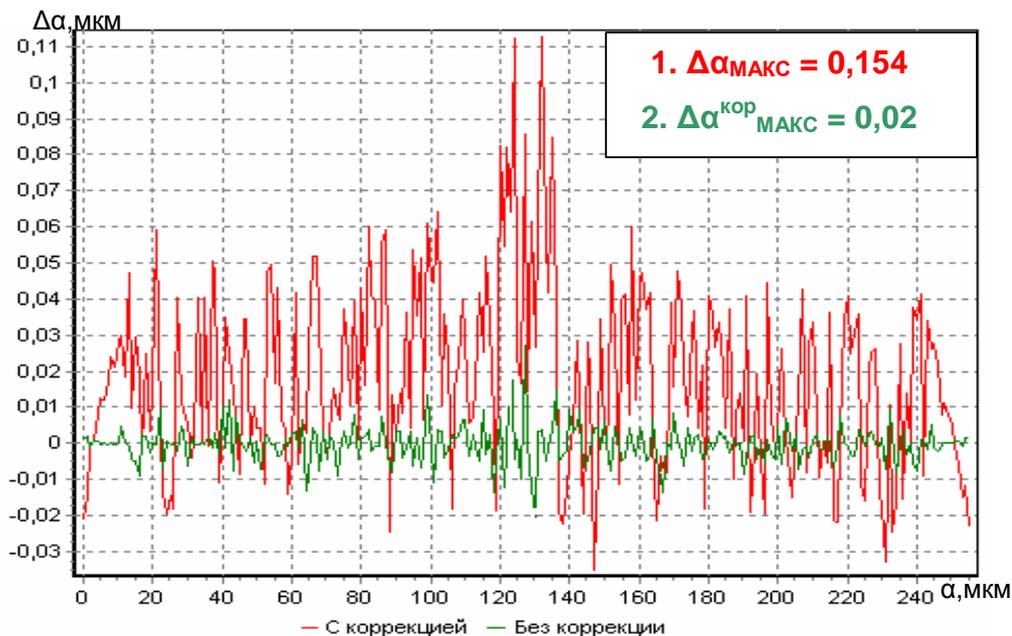


Рис. 5. Погрешность функции отклика: без автокоррекции (линия 1), с автокоррекцией (линия 2)

ких условий эксплуатации: научное издание. - Самара: Самарск. гос. аэрокосм. ун-т, 1998.

2. Домрачев В. Г., Мейко Б. С. Цифровые преобразователи угла: принципы построения, теория точности, методы контроля. - М.: Энергоатомиздат, 1984.

3. Леонович Г. И., Ратис Ю. Л. Дифракция светового потока на чувствительных элементах волоконно-оптических и оптико-электронных датчиков механических перемещений //Компьютерная оптика. - 1996. - Вып. 16. - С. 74-77.

MATHEMATICAL MODEL OF AN OPTOELECTRONIC POSITION-TO-DIGITAL CONVERTER WITH AUTOCORRECTION OF CONVERSION ERROR CAUSED BY CODING SCALE BEATS

© 2007 M. S. Roshchupkin, P. L. Tokmak, G. I. Leonovitch

Samara State Aerospace University

The paper presents a mathematical model of code mating of an optoelectronic position-to-digital converter. The model takes into account the effect of external destabilizing factors. The main defects of the optomechanical unit are listed and the influence of such factors on the converter response function is shown. An example of visualizing the information about the influence of vibropercussions on response function error for various amplitudes of vibration oscillations is given. The error is calculated and estimated for the case of autocorrection show the adequacy of the model and the efficiency of using autocorrection.