

Микрооптоэлектромеханический преобразователь ускорения на основе грубо-точного метода обработки сигналов интерферометра Фабри-Перо

В. И. Бусурин, В. В. Коробков, К. А. Коробков, Н. А. Кошеварова

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Российская Федерация, e-mail: vbusurin@mai.ru, vvkor@bk.ru,
kane_and_lynch@bk.ru, natashakoshevarova@mail.ru

В системах управления и навигации летательных аппаратов актуально применение микроэлектромеханических преобразователей ускорения. Рассмотрен микроэлектромеханический преобразователь ускорения с оптическим узлом считывания на основе двухканального интерферометра Фабри-Перо. Для улучшения точностных характеристик преобразователя предложено анализировать дробную часть полосы интерференционной картины. Исследованы изменения выходного сигнала оптического узла считывания под действием линейных ускорений при различных параметрах балочного чувствительного элемента, а также изменение пропускания интерферометра при разной отражательной способности зеркал. По зависимостям пропускания интерферометра от перемещения определены условия переключения между двумя каналами для обхода зон с низкой чувствительностью. Разработан метод обработки оптических сигналов, который формирует выходное значение путём конкатенации грубых результатов измерений и рассчитанной точной составляющей. Предложенный метод обработки позволяет увеличить точность результатов измерений ускорения без изменения диапазона преобразования.

Ключевые слова: преобразователь ускорения, микроэлектромеханические системы, оптический съём, интерферометр Фабри-Перо, грубо-точный метод, микроперемещения, погрешность.

Введение. В настоящее время для многих прикладных задач управления подвижными объектами актуально использование небольших микроэлектромеханических систем (МЭМС) [1, 2]. Отдельным типом МЭМС-устройств являются преобразователи ускорения, предназначенные для восприятия и преобразования ускорения в выходной электрический сигнал. Малогабаритные преобразователи ускорения можно применять для повышения точности систем контроля положения беспилотных летательных аппаратов, манипуляторов и т. п. [3, 4].

Неотъемлемой частью любого преобразователя ускорения служит его чувствительный элемент (ЧЭ). Рабочий ход ЧЭ составляет единицы микрометров. Минимизация рабочего хода позволяет добиться малой поперечной чувствительности в МЭМС-преобразователе ускорений. Для получения информации о микроперемещениях ЧЭ в МЭМС часто используют ёмкостный съём, к недостаткам которого относятся чувствительность к электромагнитным помехам и возможность электрического пробоя между обкладками. Эти недостатки можно минимизировать, если применять оптические методы съёма информации [5, 6], в частности интерферометрический съём в микрооптоэлектромеханических системах (МОЭМС) [7, 8]. На основе анализа целого числа полос

интерференционной картины с помощью интерферометра измеряют микроперемещения ЧЭ, возникающие под действием ускорения. При этом абсолютная погрешность измерения не превышает значение длины волны источника излучения.

Динамические смещения с высокой чувствительностью и погрешностью порядка 5 нм можно определить с помощью дополнительных средств, например с использованием оптоэлектронного метода регистрации сигнала лазерного интерферометра в совокупности с алгоритмом обработки [9]. Обработка предлагаемым грубо-точным методом позволяет уменьшить погрешность измерений МЭМС-преобразователя ускорений с оптическим узлом считывания на основе интерферометра Фабри-Перо. При таком подходе не только подсчитывается целое число полос интерференционной картины, представляющих собой грубое значение измерений, но и анализируется дробная часть полосы, в ходе чего формируется точная составляющая измерений (так называемая добавка). При этом анализ дробной части полосы выполняется исходя из результатов измерения оптической мощности одного из каналов регистрации в пределах выделенных интервалов.

Структурная схема преобразователя ускорения на основе грубо-точного метода обработки интерференционных сигналов. В качестве ЧЭ в оптических преобразователях ускорения обычно используется инерционная эталонная масса в виде твёрдого тела, которая крепится к основанию или базе гибкими элементами, например, пружинами или торсионными. Одним из инженерных решений является ЧЭ в виде квадратной плоскопараллельной пластины, подвешенной на двух G-образных пружинах. При этом пружины закреплены на серединах противоположенных краёв пластины и лежат в плоскости ЧЭ. Интерферометрическим методом детектируются перемещения, нормальные к плоскости пластины [10]. Перемещения пластины могут происходить и вдоль её плоскости. В этом случае пластина крепится за углы

четырьмя взаимно параллельными плоскими пружинами, которые позволяют ей двигаться только вдоль одной оси. Перемещения усиливаются балкой V-образной формы. Зеркало, расположенное посередине V-образной балки, и торцевая поверхность сколотого оптического волокна образуют резонатор интерферометра [11]. Также используются балочные элементы, например в виде простых в изготовлении пластин из кварца. В таком случае анализируется не изменение положения ЧЭ, а его деформация. При реализации грубо-точного метода для съёма информации в преобразователе ускорения предлагается использовать интерферометр Фабри-Перо и блоки обработки и преобразования.

При рабочих перемещениях ЧЭ порядка единиц микрометров результат обычной обработки выходных сигналов

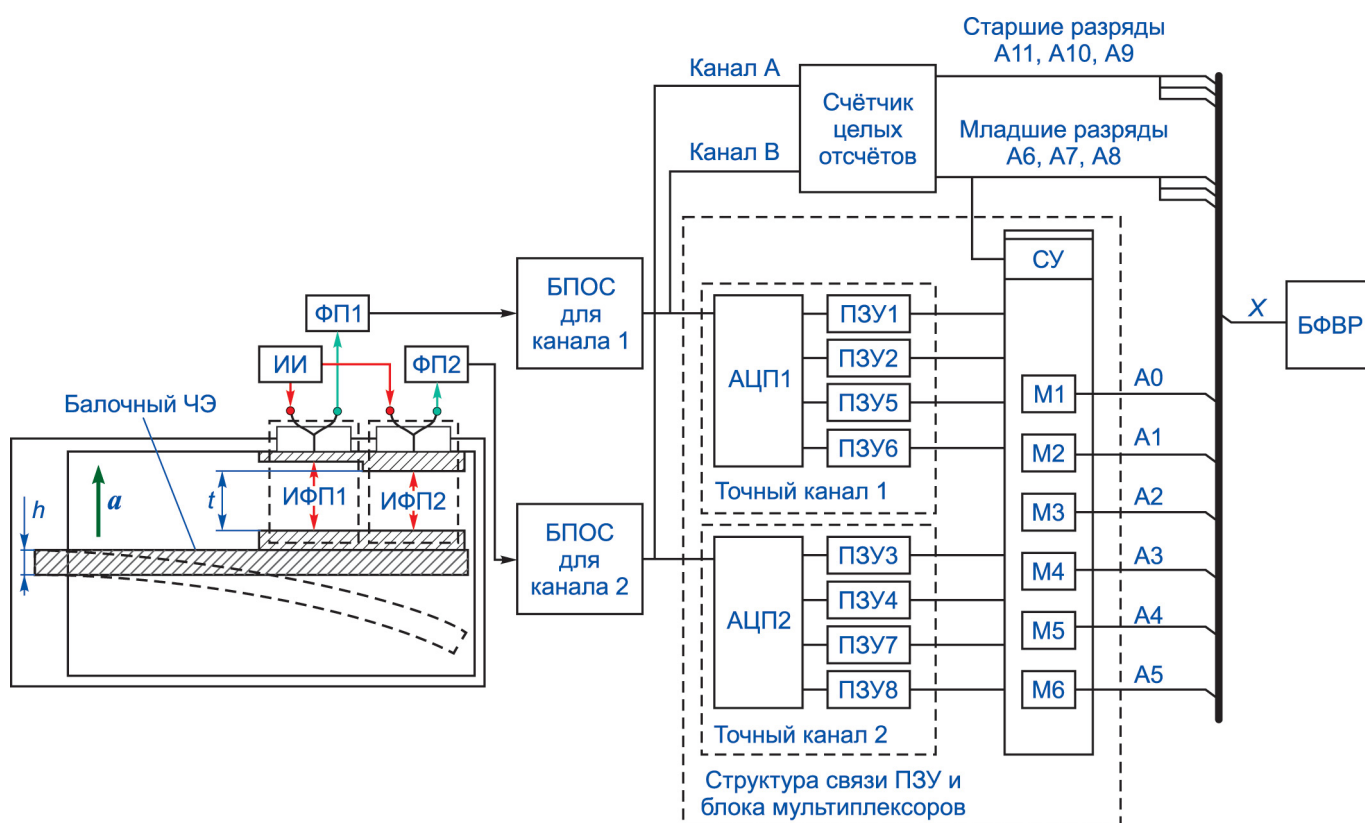


Рис. 1. Структурная схема МОЭМ-преобразователя ускорения на основе грубо-точного метода обработки сигналов: ИИ – источник излучения; ИФП1, ИФП2 – интерферометры Фабри-Перо; ФП1, ФП2 – фотоприёмники; БПОС канала 1, 2 – блоки предварительной обработки сигнала канала 1, 2; АЦП1, АЦП2 – аналогово-цифровые преобразователи; ПЗУ1,..., ПЗУ8 – постоянные запоминающие устройства; СУ – сигнал управления; М1–М6 – мультиплексоры; a – измеряемое ускорение; h – толщина ЧЭ; X – n -разрядный выходной код; $A0$ – $A5$ – k -разрядный код количества целых отсчётов; $A6$ – $A11$ – m -разрядный код добавки; БФВР – блок формирования выходного результата

Fig. 1. Structural diagram of MOEM acceleration transducer based on a roughly-accurate method of signal processing: RS – radiation source; IFP1, IFP2 – Fabry-Perot interferometers; PD1, PD2 – photo detectors; SPU channel 1, 2 – channel 1, 2 Signal Preprocessing Unit; ADC1, ADC2 – analog to digital converters; ROM1, ..., ROM8 – read-only memories 1,...,8; CS – Control Signal; M1–M6 – multiplexers; a – measured acceleration; h – sensitive element (SE) thickness; X – n -bit output code; $A0$ – $A5$ – k -bit code of the number of entire counts; $A6$ – $A11$ – m -bit code of additive; ORFU – Output Result Formation Unit

интерферометра содержит достаточно большую погрешность измерений, связанную с частотой дискретизации данного способа получения информации, диапазоном измерения и искаженностью сигналов случайными помехами различной природы. Для повышения устойчивости к влиянию случайных помех можно задействовать алгоритмы, основанные на преобразовании Фурье. Но такие алгоритмы требуют наличия полной реализации сигнала, что ограничивает их быстроедействие. Поэтому предпочтение отдаётся использованию рекуррентных алгоритмов обработки дискретной последовательности отсчётов интерферометрического сигнала [12]. При применении гомодинных лазерных интерферометров возникает квадратурная фазовая ошибка, вызванная перекрестными помехами во время расщепления луча [13]. Один из недостатков гетеродинных лазерных интерферометров – сложность оптической схемы, требующей дополнительных оптических компонентов, обусловленная использованием пространственно разделённых лучей с разными частотными составляющими [14].

Использование грубо-точного метода обработки интерференционных сигналов, основанного на совместной аналоговой и цифровой обработке, позволяет улучшить точностные характеристики МОЭМС-преобразователя ускорения без усложнения оптической схемы. К грубым отсчётам, связанным с долями ширины полосы интерференционной картины, добавляются точные отсчёты, определяемые по величине сигналов в каждом интервале. Грубые отсчёты формируются в системе двух интерферометров Фабри-Перо, максимумы на интерферометрических картинах которых смещены на четверть ширины полосы. Связанный с шириной полосы период τ аналогового выходного сигнала каждого интерферометрического канала делится на четыре интервала. С учётом двух каналов в каждой полосе интерференционной картины можно выделить восемь интервалов, анализ которых позволяет организовать переключение между каналами и сформировать добавку. Количество разрядов выходного значения преобразователя, выделяемых на добавку, может варьироваться в зависимости от реализуемой точности.

Разработана структурная схема МОЭМС-преобразователя ускорения на основе грубо-точного метода обработки интерференционных сигналов. На его выходе формируется n -разрядный код, в котором m разрядов выделяются на подсчёт целых отсчётов (грубая составляющая); $k=(n-m)$ разрядов формируют добавку (точная составляющая). Например, для структурной схемы на рис. 1 значения n , m , k составляют 12; 6; 6 соответственно. Структурная схема содержит следующие элементы: балочный ЧЭ толщиной h ; два интерферометрических канала; блоки предварительной обработки сигналов БПОС для канала 1 и канала 2; блоки *точного канала 1* и *точного канала 2*; мультиплексоры $M1-M6$ и блок подсчёта целых отсчётов. Интерферометрические каналы включают источник излучения ИИ, блоки интерферометров Фабри-Перо ИФП1, ИФП2 и фотоприёмники ФП1, ФП2. Блоки предварительной обработки

сигналов состоят из преобразователя «ток-напряжение» и усилителя. Блоки *точный канал 1* и *точный канал 2* содержат аналогово-цифровые преобразователи АЦП1, АЦП2 и постоянные запоминающие устройства ПЗУ1, ..., ПЗУ8 для хранения данных о добавке. При этом добавка представляет собой добавочный двоичный код, однозначно связанный с мощностью сигнала на каждом из восьми выделенных интервалов. Счётчик целых отсчётов содержит компараторы и логическую схему обработки. Блок мультиплексоров в зависимости от управляющих сигналов с помощью ПЗУ1, ..., ПЗУ8 формирует на выходе преобразователя добавку.

Для корректного определения направления ускорения требуются два оптических канала схемы. Оптическое излучение источника модулируется в зависимости от микроперемещений ЧЭ t , вызванных измеряемым ускорением a , и поступает на фотоприёмники. Оптический сигнал преобразуется в фототок, а затем – в напряжение, пропорциональное оптической мощности. Выходное напряжение усиливается и с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) преобразуется в двоичный код. Этот код подаётся на постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) и является адресом ячейки, где хранится информация о добавочном сигнале. Так как обработка грубо-точным методом предполагает разделение периода сигнала каждого канала на четыре равных интервала, то в каждом канале расположены четыре ПЗУ.

Грубую составляющую результатов измерений формирует счётчик целых отсчётов, реализованный на основе компаратора и последующей логической схемы обработки. На выходе счётчика формируются целые отсчёты значений микроперемещений в двоичном коде.

В зависимости от номера интервала двоичный код – адрес ячейки памяти – поступает в соответствующее ПЗУ. Далее из ПЗУ выходное двоичное число передаётся на мультиплексоры, управляемые младшими разрядами счётчика целых отсчётов. Это обеспечивает формирование добавки в виде шести разрядов двоичного кода, уточняющей грубые результаты. Конкатенация целых отсчётов и добавки формирует выходное число X .

При условии, что целый отсчёт равен $0,4 \cdot 10^{-7}$ м при количестве уровней 64, итоговая погрешность составляет около $0,006 \cdot 10^{-7}$ м. С помощью такого метода грубо-точной обработки интерференционных сигналов можно уменьшить погрешность измерений более чем на порядок.

Оценка перемещений балочного ЧЭ преобразователя ускорений. Функция преобразования датчика ускорения на основе оптического считывания представляет собой зависимость выходного напряжения от ускорения a , которое определяет прогиб ЧЭ.

Ускорение, действующее на балочный ЧЭ, можно представить в виде двух составляющих a_1 , a_2 , направленных вдоль нейтрального положения балки и перпендикулярно этому положению соответственно. При воздействии ускорений балка начинает деформироваться относительно основной оси чувствительности. Балочный вид воспринимающего элемента предназначен для формирования

деформации под действием ускорения, перпендикулярно плоскости пластины.

Под воздействием ускорения a_2 балка отклоняется от исходного положения. Отклонение конца балки при воздействии ускорения определяют как [15]:

$$r_2(a_2) = ma_2 l^3 / (8EI),$$

где r_2 – перемещение вдоль вертикальной оси; a_2 – измеряемое ускорение; m – масса балочного ЧЭ; l – длина балки; E – модуль упругости; I – момент инерции.

Момент инерции I рассчитывают по формуле

$$I = bh^3 / 12,$$

где b , h – соответственно ширина и толщина балочного ЧЭ.

Толщина h влияет на чувствительность преобразователя, изменяя диапазон деформаций ЧЭ. Зависимость деформации свободного края выполненного из кварца ЧЭ от вертикального ускорения при разных размерах балочного ЧЭ представлена на рис. 2. Перемещение крайней точки ЧЭ связано гиперболической зависимостью с толщиной h . При ускорении $a_2 = 100 \text{ м/с}^2$ и толщинах $h_1 = 0,125 \text{ мм}$, $h_2 = 0,25 \text{ мм}$, $h_3 = 0,5 \text{ мм}$ перемещения составляют соответственно $r_{21} = 2,7 \text{ мкм}$, $r_{22} = 0,7 \text{ мкм}$, $r_{23} = 0,2 \text{ мкм}$. Результаты измерений перемещений такого порядка традиционным интерферометрическим методом будут содержать большую погрешность, что делает неэффективным использование этого метода. Грубо-точный метод обработки позволяет интерферометрической системе измерять перемещения порядка десятков и единиц нанометров.

Одним из источников погрешности является изменение температуры. Изготовление всего ЧЭ из одного термостабильного материала, например плавленого кварца, а также измерение температуры и соответствующая коррекция результатов измерений обеспечивают меньшую зависимость показаний от температуры.

Математическая модель двухканального интерференционного узла считывания информации. Интерференционные информационно-измерительные системы относят к самым чувствительным и точным. Фазовые сдвиги можно измерять с высокой (10^{-3} – 10^{-6} рад) точностью, и при малой рабочей длине волны принципиально достижимы высокие точностные характеристики.

Теория многопроходных интерферометров определяет зависимость пропускания T интерферометра от фазового набег δ между зеркалами с отражательной способностью R , которая описывается формулой Эйри [16]:

$$T(\delta) = (1-R)^2 / \{ (1-R)^2 + 4R[\sin(\delta/2)]^2 \}.$$

Фазовый набег рассчитывают [16] по формуле

$$\delta = 4\pi t / \lambda,$$

где t – расстояние между зеркалами интерферометра (база интерферометра); λ – длина волны излучения в среде между зеркалами.

Коэффициент отражения варьируется в диапазоне 0–1. Отражательная способность R существенно влияет на

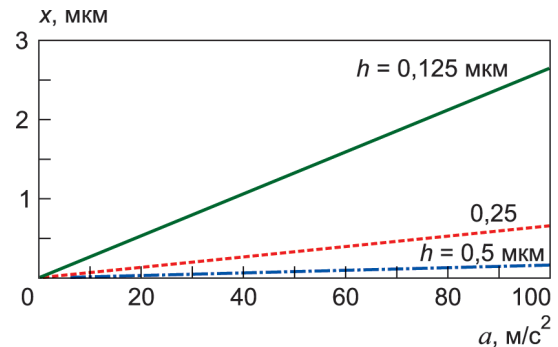


Рис. 2. Зависимость перемещения x свободного края ЧЭ от действия вертикального ускорения a ($l = 10 \text{ мм}$); h – толщина ЧЭ

Fig. 2. Dependence of displacement on the action of vertical acceleration ($l = 10 \text{ mm}$): a – measured acceleration; h – SE thickness; x – SE free edge displacement

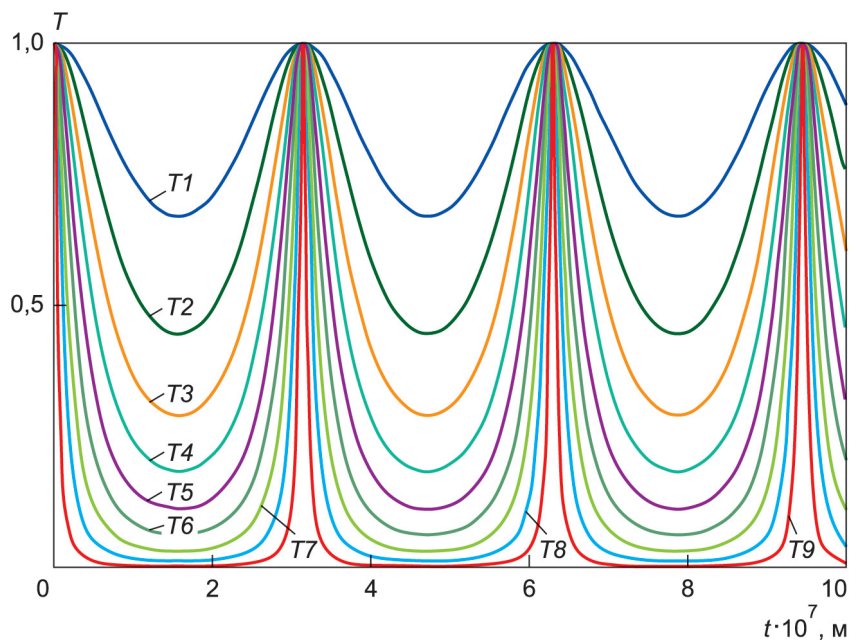


Рис. 3. Зависимость пропускания T интерферометра от перемещения t при $R = 0,1 \dots 0,9$ – кривые $T1, T2, \dots, T9$ соответственно

Fig. 3. Dependence of the interferometer transmittance T on the displacement t for various values of R : $T1(t)$: $R = 0.1$; $T2(t)$: $R = 0.2$; ... $T9(t)$: $R = 0.9$

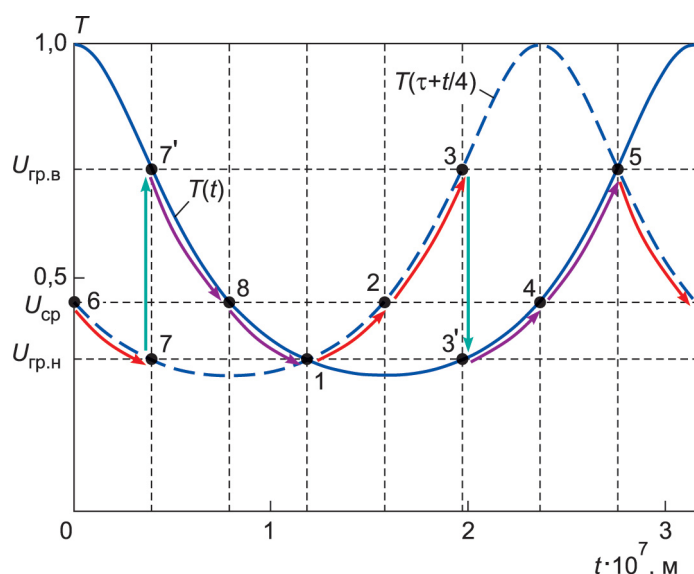


Рис. 4. Зависимость пропускания T двух интерферометров от перемещения t при $U_{гр.н}=0,32$ В; $U_{гр.в}=0,74$ В; $U_{ср}=0,45$ В; стрелками показано переключение между каналами при движении в сторону увеличения зазора

Fig. 4. The dependence of the transmission of two interferometers on the movement t ($U_{lb}=0.32$ V; $U_{hb}=0.74$ V; $U_r=0.45$ V), arrows show switching between channels when moving towards gap increasing

зависимость пропускания интерферометра от перемещения (рис. 3). Резкие пики максимумов позволяют считывать информацию с точностью до $\lambda/2$. Для работы со значениями в дробной части полосы необходимо получить более плавную зависимость пропускания интерферометра от базы t .

Интерференционная картина при изменении расстояния t между зеркалами имеет ярко выраженные экстремумы. Для получения приемлемой чувствительности в зонах дробной части полосы проведено моделирование характеристик при различных значениях отражательной способности зеркал интерферометра. Отражательная способность зеркал R с интервалом $\Delta R=0,1$ варьируется в диапазоне 0,1–0,9 для кривых $T1$ – $T9$ (см. рис. 3).

При близкой к единице отражательной способности зависимость пропускания интерферометра от перемещения представляет собой последовательность максимумов, индицируется только момент перехода через определенное значение расстояния t . При уменьшении отражательной способности R наблюдаются более плавные зависимости. В то же время сильное уменьшение коэффициента отражения приводит к уменьшению перепадов пропускательной способности интерферометра. Так, при отражательной способности $R=0,9$ диапазон пропускания составляет 0–1, а при $R=0,1$ – диапазон пропускания 0,75–1.

При использовании зеркал с промежуточными значениями отражательной способности, например $R=0,3$,

обеспечивается возможность работы в дробной части полосы при достаточно большом диапазоне перепадов пропускательной способности интерферометра.

Интервалы между максимумами выбираются для обеспечения приемлемой чувствительности к перемещению в пределах каждого интервала. Необходимо определять границы, это позволит согласовать переходы от одного интервала к другому и обеспечить учёт показаний при переходе между ними.

Зависимости пропускания двух интерферометров от перемещения приведены на рис. 4. Для выбора уровня напряжения срабатывания период зависимости пропускания интерферометра от перемещения делится на четыре равных интервала, и фиксируются значения выходных оптических сигналов, соответствующие границам выделенных областей. Уровень, где графики зависимостей пересекают эти границы, определяет напряжение срабатывания $U_{ср}$. Точки 2; 4; 6; 8 определяются пересечением сигналов каналов с напряжением срабатывания, а точки 1; 7 и 3; 5 – это нижняя $U_{гр.н}$ и верхняя $U_{гр.в}$ граничные точки, ниже и выше которых соответственно начинаются зоны с низкой чувствительностью. В указанных зонах работать нецелесообразно, поэтому организуют переключения между каналами. Переключения между интерферометрическими каналами происходят в точках 1; 3; 5; 7. Так как в пределах каждой зоны чувствительность не является постоянной, значения пересчитываются в соответствии с формой сигнала.

Для подсчёта целого числа полос сигналы обоих оптических каналов обрабатывают с использованием компараторов и логических схем, разработанных на основе уравнений движения в стороны увеличения и уменьшения зазора (переключение между каналами при движении в сторону увеличения зазора на рис. 4 показано стрелками). Напряжение срабатывания выбирается в точках 2; 4; 6; 8.

Алгоритм функционирования преобразователя ускорения на основе грубо-точного метода обработки информации об ускорении. Сигналы фотоприёмников преобразуются в напряжения, которые усиливаются и поступают в блок для подсчёта целых отсчётов с помощью компараторов. С выхода счётчика двоичный код (например шестизначный) поступает в блок формирования выходного результата и является его грубой составляющей. Дополнительно анализируется каждый интервал между максимумами и подсчитывается промежуточный результат внутри него.

Формирование добавки происходит путём подачи сигналов каналов A , B (см. рис. 1) на АЦП1, АЦП2, с которых двоичный код, являющийся адресом, поступает на ПЗУ (для первого канала – ПЗУ1, ПЗУ2, ПЗУ5, ПЗУ6; для второго канала – ПЗУ3, ПЗУ4, ПЗУ7, ПЗУ8). Данные ячеек ПЗУ по выбранным адресам в виде двоичного кода поступают на мультиплексоры, на выходе которых в зависимости от участка работы формируется добавка. Например, для работы на первом участке на управляющий вход мультиплексоров поступает кодовая комбинация «001», и тогда на выходе каждого мультиплексора появится сигнал, пришедший из ПЗУ1.

Аналогично, кодовые комбинации (010, 011, 100, 101, 110, 111, 000) остальных участков поступают на вход мультиплексоров в виде двоичного кода, соответствующего номеру участка, на котором идет работа, и обеспечивают подключение соответствующего ПЗУ. Структуру устройства связи ПЗУ и блока мультиплексоров для определения добавки см. на рис. 1.

С учётом текущего участка работы на выходе мультиплексоров формируется добавка в виде двоичного кода, например шестиразрядного. Двоичный код с блока мультиплексоров поступает в блок формирования выходного результата, дополняя грубую составляющую точной.

При формировании шестиразрядного двоичного кода грубого канала один отсчёт составляет около 40 нм. С использованием также шести разрядов для формирования добавки в полном диапазоне одного грубого отсчёта можно выделить 64 уровня, что будет соответствовать итоговой погрешности измерения примерно 0,6 нм. В результате формируется двенадцатиразрядный код, обеспечивающий малую погрешность измерения, зависящую от погрешностей аналоговых сигналов.

Смоделирована работа преобразователя ускорения на основе грубо-точного метода обработки интерференционных сигналов. На основе структурной схемы и алгоритма

функционирования преобразователя, разработана математическая модель, графическое представление которой приведено на рис. 5.

Входное ускорение приводит к деформациям ЧЭ. Значение перемещения подаётся на блок интерферометра Фабри-Перо ИФП, который представляет собой зависимость пропускания интерферометра от перемещения. На выходе блока моделирования работы ИФП формируются сигналы каналов *A*, *B*. Часть сигналов каналов поступает в блок счётчика целых отсчётов, в котором реализованы компараторы и логические схемы, осуществляющие подсчёт целого числа полос интерференционной картины. Старшие шесть разрядов с выхода счётчика целых отсчётов поступают в блок формирования грубой составляющей результата. Другая часть сигналов поступает в блок определения точной составляющей, который включает в себя АЦП, ПЗУ и мультиплексоры, управляющиеся тремя младшими разрядами счётчика целых отсчётов. Конкатенация грубого и точного результатов формирует выходное значение, зависящее от воздействующего линейного ускорения.

Например, при подаче на вход ускорения $a=100 \text{ м/с}^2$, производящего перемещение $x=2,65 \text{ мкм}$, на выходе

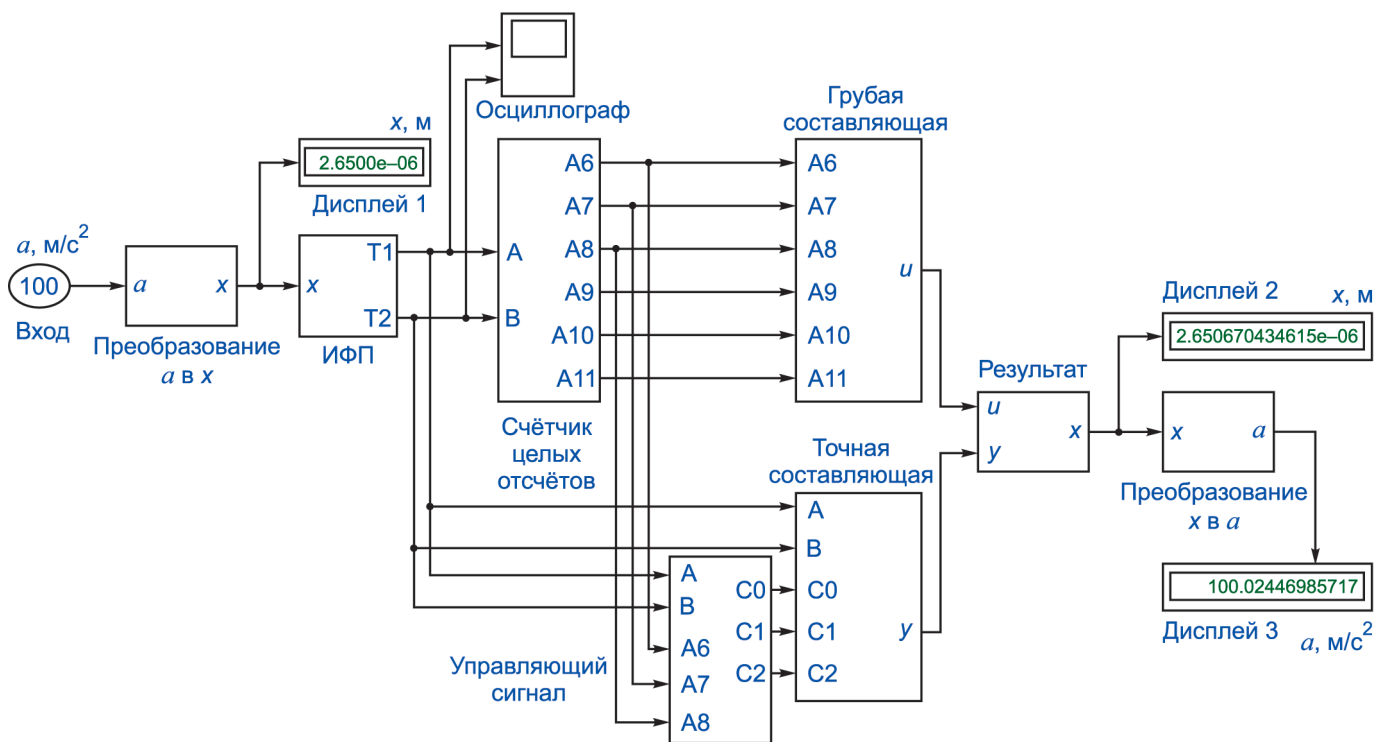


Рис. 5. Математическая модель преобразователя ускорения на основе грубо-точного метода обработки интерференционных сигналов: u – m -разрядное значение целых отсчётов (грубая составляющая); y – k -разрядное значение добавки (точная составляющая); $C0...C2$ – разряды трёхразрядной кодовой комбинации, подающейся на управляющий вход мультиплексоров и определяющей участок работы; ИФП – то же, что на рис. 1

Fig. 5. The mathematical model of the acceleration transducer based on a roughly-accurate method of interference signals processing: u – m -bit value of integer samples (rough component); y – k -bit value of the additive (exact component); $C0...C2$ – bits of a three-bit code combination that is fed to the control input of multiplexers and determines the work area; IFP – the same as in Fig. 1

формируется код, значение которого соответствует перемещению $x=2,6507$ мкм, производимому ускорением $a=100,02$ м/с². Погрешность преобразования составляет десятые доли нанометров для перемещения, сотые доли метра, делённого на секунду в квадрате, – для линейного ускорения, и не превышает 0,02 %.

Заключение. Предложенный алгоритм обработки информации о линейном ускорении позволяет уменьшить погрешность измерения за счёт формирования точной добавки к грубой составляющей. С учётом зависимости пропускания интерферометров с малой отражательной способностью от перемещения определены условия переключения между двумя каналами для обхода зон с низкой чувствительностью. При моделировании работы устройства обработки информации преобразователя установлено, что с использованием грубо-точного метода формирования выходного сигнала прецизионный преобразователь ускорения с интерферометрическим считыванием обеспечивает повышенную (на уровне единиц нанометров) точность измерений перемещений. Таким образом, подобный преобразователь можно эффективно использовать в системах управления и навигации летательных аппаратов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-08-00108).

Список литературы

1. Косцов Э. Г. Состояние и перспективы микро- и наноэлектромеханики // *Автометрия*. 2009. № 3. С. 3–52.
2. Мастеренко Д. А., Телешевский В. И. Особенности обработки измерительной информации при высокоточных линейных и угловых измерениях // *Измерительная техника*. 2016. № 12. С. 11–15.
3. Krasnova S. A., Antipov A. S., *Automation and Remote Control*, 2018, vol. 79, no. 3, pp. 554–570. <https://doi.org/10.1134/S000511791803013X>
4. Kokunko Yu., Krasnova S., *Mathematics in Engineering, Science and Aerospace (MESA)*, 2019, vol. 10, no. 4, pp. 695–705.
5. Busurin V. I., Korobkov V. V., Naing Htoo Lwin, Phan Anh Tuan, *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 737, 012045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/737/1/012045>
6. Бусурин В. И., Иин Н. В., Жеглов М. А. Анализ влияния линейного ускорения на характеристики кольцевого оптоэлектронного преобразователя угловой скорости и его компенсация // *Автометрия*. 2019. № 3. С. 120–128. <https://doi.org/10.15372/AUT20190314>
7. Бусурин В. И., Коробков В. В., Горшков Б. Г., Дьячков В. В. ТВМ-преобразователь угловой скорости с интерферометрическим считыванием информации // *Датчики и системы*. 2017. № 5. С. 37–43.
8. Бусурин В. И., Коробков В. В., Нгуен Тхань Зыонг, Данг Ван Хуен. Волновой микроопто-электромеханический преобразователь угловой скорости с интерферометром Фабри-Перо // *Датчики и системы*. 2019. № 3. С. 27–33.

9. Осипов М. Н., Попов М. А. Измерения малых динамических смещений интерферометром Майкельсона со сферическими волновыми фронтами // *Компьютерная оптика*. 2007. Т. 31. № 4. С. 55–57.

10. Minghui Zhao, Kangli Jiang, Hongwu Bai, Hairong Wang, Xueyong Wei, *Microsystem Technologies*, 2020, vol. 26, pp. 1961–1969. <https://doi.org/10.1007/s00542-020-04747-3>

11. Edward Davies, David S. George, Malcolm C. Gower, Andrew S. Holmes, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, vol. 215, pp. 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.08.002>

12. Волинский М. А., Гуров И. П., Скаков П. С. Рекуррентный алгоритм обработки интерферометрических сигналов на основе мультиоблачной модели предсказания // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2014 г. № 4 (92). С. 18–22.

13. Junning Cui, Zhangqiang He, Yuanwei Jiu, Jiubin Tan, Tao Sun, *Applied Optics*, 2016, vol. 55, no. 25, pp. 7086–7092. <https://doi.org/10.1364/AO.55.007086>

14. Ki-Nam Joo, Jonathan D. Ellis, Jo W. Spronck, Paul J. M. van Kan, Robert H. Munnig Schmidt, *Optics Letters*, 2009, vol. 34, no. 3, pp. 386–388. <https://doi.org/10.1364/OL.34.000386>

15. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов: Учебник для вузов. Серия Механика в техническом университете. Т. 2. Изд. 10-е, перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. 592 с.

16. Борн М., Вольф Э. Основы оптики: изд. 2-е. Пер. с англ. М.: Наука, 1973. 713 с.

References

1. Koscov E. G., *Avtometriya*, 2009, no. 3, pp. 3–52 (in Russian).
2. Masterenko D. A., Teleshevskij V. I., *Measurement Technique*, 2017, vol. 59, no. 12, pp. 1254–1259. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1125-3>
3. Krasnova S. A., Antipov A. S., *Automation and Remote Control*, 2018, vol. 79, no. 3, pp. 554–570. <https://doi.org/10.1134/S000511791803013X>
4. Kokunko Yu., Krasnova S., *Mathematics in Engineering, Science and Aerospace (MESA)*, 2019, vol. 10, no. 4, pp. 695–705.
5. Busurin V. I., Korobkov V. V., Naing Htoo Lwin, Phan Anh Tuan, *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 737, 012045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/737/1/012045>
6. Busurin V. I., Win Y. N., Zheglov M. A., *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2019, vol. 55, pp. 309–316. <https://doi.org/10.15372/AUT20190314>
7. Busurin V. I., Korobkov V. V., Gorshkov B. G., D'yachkov V. V., *Sensors and Systems*, 2017, no. 5, pp. 37–47 (in Russian).
8. Busurin V. I., Korobkov V. V., Nguen Than' Zyong, Dang Van Huen, *Sensors and Systems*, 2019, no. 3, pp. 27–33 (in Russian).
9. Osipov M. N., Popov M. A., *Computer Optics*, 2007, vol. 31, no. 4, pp. 55–57 (in Russian).

10. Minghui Zhao, Kangli Jiang, Hongwu Bai, Hairong Wang, Xueyong Wei, *Microsystem Technologies*, 2020, vol. 26, pp. 1961–1969. <https://doi.org/10.1007/s00542-020-04747-3>
11. Edward Davies, David S. George, Malcolm C. Gower, Andrew S. Holmes, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, vol. 215, pp. 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.08.002>
12. Volynskij M. A., Gurov I. P., Skakov P. S., *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 4 (92), pp. 18–22 (in Russian).
13. Juning Cui, Zhangqiang He, Yuanwei Jiu, Jiubin Tan, Tao Sun, *Applied Optics*, 2016, vol. 55, no. 25, pp. 7086–7092. <https://doi.org/10.1364/AO.55.007086>
14. Ki-Nam Joo, Jonathan D. Ellis, Jo W. Spronck, Paul J. M. van Kan, Robert H. Munnig Schmidt, *Optics Letters*, 2009, vol. 34, no. 3, pp. 386–388. <https://doi.org/10.1364/OL.34.000386>
15. Feodos'ev V. I., *Soprotivlenie materialov: Uchebnik dlya vuzov*, Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 1999, 592 p. (in Russian).
16. Max Born, Emil Wolf, *Principles of Optics*, 4th ed., Pergamon Press, 1970.

Дата поступления: 03.06.2020.

Дата принятия: 28.08.2020.

Microoptoelectromechanical acceleration transducer based on a roughly-accurate method of Fabry-Perot interferometer signal processing

Vladimir I. Busurin, Vadim V. Korobkov, Kirill A. Korobkov, Nataliya A. Koshevarova

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation,
e-mail: vbusurin@mai.ru, vvkor@bk.ru, kane_and_lynch@bk.ru, natashakoshevarova@mail.ru

The use of microelectromechanical acceleration transducers is actual in control and navigation systems of aircraft. A microelectromechanical acceleration transducer with an optical reading unit based on a two-channel Fabry-Perot interferometer is considered. Proposed to analyze fractional part of the interference pattern's fringe to improve the accuracy of the transducer. Changes in the output signal of the optical reading unit under the action of linear accelerations at various parameters of the beam-type sensitive element and change in the interferometer's transmission at different reflectivity of the mirrors are investigated. The conditions for switching between two channels for bypassing zones with low sensitivity are determined according to the dependences of the interferometer transmission on displacement. A method for processing optical signals has been developed, which forms the output value by concatenating rough measurement results and the calculated accurate component. The proposed processing method makes it possible to increase the accuracy of the acceleration measurements without changing the conversion range.

Key words: acceleration transducer, microelectromechanical systems, optical reading, Fabry-Perot interferometer, roughly-accurate method, micromovings, error.