

УДК 681.586.5, 531.768.

П. А. Демьяненко, Ю. Ф. Зиньковский

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ С ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ОПТИЧЕСКОГО ПОТОКА

Исследуется проблема метрологически низких возможностей измерителей на основе аналоговых волоконно-оптических датчиков (ВОД), анализируются ее причины и обосновывается переход к импульсным (дискретным) принципам модуляции параметров оптического потока в ВОД. Для этого в оптический поток вводятся дополнительные, неоптические, параметры, на которые перекладывается роль реципиентов информации, и с которых эта информация может быть воспроизведена с необходимой точностью. Разработана оптическая схема и конструкция ВОД с импульсной модуляцией интенсивности оптического потока (ИВОД), проведены метрологические расчеты параметров измерителя линейных ускорений, построенного на основе ИВОД.

Ключевые слова: волоконно-оптические датчики ускорения, импульсная модуляция, волоконно-оптические акселерометры.

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря удачному сочетанию в волоконных световодах (ВС) ряда уникальных технических и эксплуатационных параметров волоконная оптика (ВО) стремительно вошла в современную технику связи (в первую очередь дальнюю) и очень скоро обрела там господствующее положение. Главными составляющими такого успеха ВО выступили два фактора.

Во-первых — малое затухание оптического сигнала при его распространении по ВС. В наше время уже достигнут теоретический предел затухания для ВС типа «кварц — кварц» ($\alpha = 0.18$ дБ/км), что позволяет реализовать безретрансляционные участки ВО-трактов длиной до 340 км [23], а это более чем в 200 раз превышает расстояние между ретрансляторами в системах электрической связи с коаксиальными кабелями [22]. В перспективе использование халькогенид-

ных и фторидных материалов как возможной основы для производства ВС сулит настолько низкие затухания сигнала ($\alpha \sim 10^{-3}$ дБ/км), что станет возможной прокладка безретрансляторных ВО-трактов в глобальных масштабах. Пока, однако, не найдено удовлетворительного решения технологических проблем — формирования ВС из кристаллических материалов. Добавим, что возможности увеличения длин безрепитерных участков линий связи на базе обычных (кварцевых) ВС также еще до конца не исчерпаны. Использование солитонного режима передачи импульсов по обычным кварцевым ВС позволило существенно (до 1000 км) увеличить длины безретрансляторных участков волоконно-оптических систем связи (ВОСС) [19].

Во-вторых — ВО-линии обеспечивают настолько широкую полосу частот каналируемых ими сигналов, которая принципиально недостижима в электрических линиях связи. Так, сегодня уже достигнута скорость передачи информации по ВО-линиям 1 Пбит/с (1 Пбит/с =

© П. А. ДЕМЬЯНЕНКО, Ю. Ф. ЗИНЬКОВСКИЙ, 2015

= 10^{15} бит/с), а по прогнозам российского академика Е. М. Дианова в ближайшее 10-летие будут разработаны ВО-системы связи, скорость передачи данных в которых составит от 10 до 100 Пбит/с [<http://www.km.ru/science-tech/2013/06/05/nauka-i-tehnologii/712498-akademik-dianov-mir-nakhoditsya-na-poroge-peta-er>].

При этом, чтобы у читателя не сложилось ошибочного мнения, будто бы ВО была призвана обеспечить потребности исключительно техники дальней связи, напомним, что впервые задача создания ВО-тракта была сформулирована и практически реализована разработчиками истребителя “Наггер” (военно-воздушные силы Великой Британии, конец 1960-х гг.) для обеспечения на его борту надежной и качественной связи.

И решающим доводом в пользу применения оптического тракта передачи информационных сигналов в этом случае стала его принципиальная невосприимчивость электромагнитных (ЭМ) помех любой интенсивности и любого происхождения. Это обстоятельство становится определяющим и при эксплуатации датчиков на современных энергонасыщенных объектах, а также в тех случаях, когда датчики необходимо размещать на значительных удалениях (сотни метров, километры) от пунктов сбора и обработки информации.

Именно эта особенность трактов канализования оптических сигналов привлекает к себе внимание разработчиков датчиков (измерительных преобразователей). Развитие автоматизации и роботизации современных производственных процессов, вплоть до создания безлюдных технологий и замкнутых самоуправляемых производств, требует применения большого количества разнообразных датчиков. Именно благодаря использованию датчиков, непрерывно контролируемых параметры производственных процессов, обеспечивается должное функционирование этих предприятий и производств. В конечном итоге именно качеством датчиков обеспечивается необходимое качество выходной продукции. Большие надежды при этом возлагаются именно на волоконно-оптические датчики (ВОД).

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ КАК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ: ОЖИДАНИЯ И РЕАЛИИ

Дадим общую характеристику ВОД. Под этой аббревиатурой обычно понимают и собственно ВОД, чувствительные элементы (ЧЭ) которых выполнены непосредственно на основе ВС, и просто оптические датчики, соединяемые с ВС, по которым к ним подводится немодулированный оптический поток и отводится модулированный.

Как и электрические, ВОД могут быть активными и пассивными. Первые под воздействием на них измеряемой величины $F(\chi)$ сами генерируют световое излучение, которое затем по ВС направляется к фотоприемнику (ФП), преобразующему оптический сигнал $I(\chi)$ в электрический $U(\chi)$ (рис. 1).

Информативным параметром оптического сигнала активных ВОД является его интенсивность, которая однозначно определяется величиной энергетического фактора $F(\chi)$, действующего на ВОД.

На основе активных ВОД могут быть построены измерители высоких температур, интенсивностей ультрафиолетового, рентгеновского, гамма- и других излучений, энергия которых достаточна для превращения ее тем или иным способом в энергию оптического излучения.

Значительно шире представлены пассивные волоконно-оптические датчики (рис. 2). В них действующая на ВОД измеряемая физическая величина лишь модулирует параметры оптического потока, проходящего через ВОД. Генерируется же этот поток внешними по отношению к ВОД источниками света (ИС), что позволяет формировать потоки излучения с требуемыми параметрами.

Поток проходящего через ВОД оптического излучения может быть охарактеризован с помощью четырех параметров, каждый из которых может быть промодулирован независимо от других. Это, в частности, интенсивность оптического потока, частота осцилляций световых волн, их фаза и пространственная ориентация их плоскости поляризации.

Соответственно с этим различают и четыре типа ВОД: амплитудные, частотные, фазовые и поляризационные. В простейших, аналоговых, ВОД измеряемая величина непрерывно модулирует какой-либо из перечисленных параметров светового потока, адекватным образом (аналогово) отображаясь в нем.

Отметим общее важное требование ко всем типам ВОД: непосредственно перед подачей оптического потока на ФП модуляция любого параметра этого потока должна быть адекватным образом (без потерь информации об измеряемой величине) преобразована в модуляцию интенсивности. Обусловлено это требование в конечном итоге тем, что дальнейшая обработка сигналов ВОД осуществляется методами и средствами электронной техники, а это значит, что оптические сигналы *a priori* должны быть преобразованы в электрические.

Такое преобразование выполняют ФП, в основе работы которых лежит явление фотоэффекта. При этом необходимо отметить, что все без исключения ФП в принципе не в состоянии отслеживать мгновенные изменения параметров световой волны. Это можно было бы объяснить, например, тем, что частота осцилляций световой волны слишком высока ($\sim 10^{15}$ Гц), а участвующие в явлении фотоэффекта элементарные носители информации (на входе ФП — фотоны, а на его выходе — электроны) существенно различаются своей инерционностью. Однако дело даже не в этом, а в том, что световой ЭМ-волны, которую принято описывать уравнениями Максвелла, как таковой не существует, а световой поток на самом деле является потоком фотонов. При этом фотоны представляют собой осциллирующие (с частотами $\sim 10^{15}$ Гц и с несогласованными в общем случае фазами) сгустки ЭМ-энергии, каждый из которых в отдельности способен проявлять присущие ему волновые свойства [10]. Очевидно, задача напрямую отобразить волновые параметры потока фотонов с помощью потока электронов является нереальной. По этой причине при прямом детектировании оптического сигнала (потока) с помощью ФП информация о модуляции его волновых параметров (фазы, частоты, поляризации) будет просто безвозвратно утеряна.

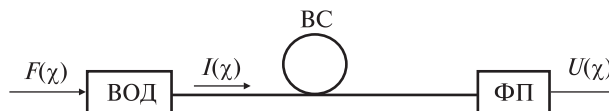


Рис. 1. Схема включения активного волоконно-оптического датчика (ВОД): ВС — волоконный световод, ФП — фотоприемник

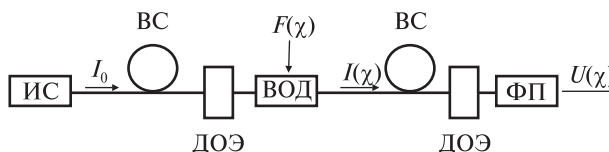


Рис. 2. Схема включения пассивного ВОД: ИС — источник света, ДОЭ — дополнительные оптические элементы, ВС — волоконный световод, ФП — фотоприемник

Вместе с тем, поскольку модуляция параметров протекающего через ВОД оптического потока, осуществляется воздействующими на него физическими величинами естественного происхождения, то и быстрота изменений оптических параметров потока при такой их модуляции будет определяться скоростью изменения параметров этих измеряемых (модулирующих) физических величин. Понятно, что временные изменения промодулированных таким образом параметров оптического потока будут уже не столь быстротечны, как изменения собственно волновых параметров оптического потока, поэтому они, в принципе, без проблем могут быть адекватно отображены в выходном сигнале ФП.

Однако в силу квантово-энергетической природы фотоэффекта ФП в принципе способен воспринимать и преобразовывать в электрический вид только один параметр оптического потока — его интенсивность, которая является его интегральным энергетическим параметром, усредненным как по большому отрезку времени t ($t \gg T$, где T — период колебаний световой волны), так и по большому числу фотонов. Обратно говоря, ФП способен адекватно преобразовывать только плотность входного потока фотонов (интенсивность оптического потока) в плотность выходного потока электронов (в силу электрического тока — фототока).

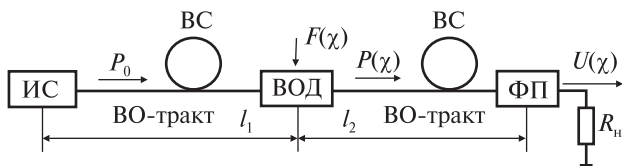


Рис. 3. Схема измерительного тракта на основе волоконно-оптического датчика: ИС — источник света, ДОЭ — дополнительные оптические элементы, ВС — волоконный световод, ФП — фотоприемник

Из этого следует, что для извлечения информации, заложенной в модуляцию волновых параметров оптического потока, эту модуляцию следует адекватным образом преобразовывать в модуляцию интенсивности. Только после такого преобразования становится возможным прямое детектирование оптического сигнала с помощью ФП, которое будет осуществляться без потерь информации, заложенной в модуляции волновых параметров сигналов.

Именно необходимостью преобразований модуляции объясняется наличие дополнительных оптических элементов (ДОЭ) в оптических схемах всех ВОД (кроме, конечно, амплитудных, которые изначально модулируют интенсивность оптического потока) (рис. 2). Это, например, элементы опорных плеч в интерферометрических схемах частотных и фазовых ВОД или же поляризаторы и анализаторы в схемах поляризационных ВОД.

Волоконно-оптические датчики давно пользуются повышенным вниманием разработчиков. А первоначальные успехи их применения в 1980-х гг. и стремительный рост объемов капиталовложений в их развитие, даже позволили некоторым авторам сделать тогда оптимистические прогнозы о замене в ближайшие 10—20 лет вообще всех традиционных (электрических) датчиков на ВОД. Основания для такого оптимизма были. Приведем пример с советской ракетой-носителем «Энергия» (1980-е гг.): замена в бортовой системе управления полетом ракеты электрических датчиков и трактов каналирования их сигналов на ВО, позволила уменьшить стартовый вес ракеты на 20 тонн.

Однако уже тогда высказывались и более взвешенные суждения относительно оптимис-

тических ожиданий широкого внедрения ВОД. Основное внимание авторы этих работ уделяли в первую очередь метрологическим возможностям измерительных устройств, использующих ВОД как измерительные преобразователи.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ АНАЛОГОВЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

При оценке метрологических возможностей ВОД их нельзя рассматривать обособленно, поскольку их возможности как измерительных преобразователей могут быть реализованы только в составе реальных измерительных устройств. При этом, помимо безусловных достоинств ВО, на метрологических параметрах ВОД отразятся также и параметры других связанных с ними элементов измерительного тракта вместе с присущими им достоинствами и недостатками. В первую очередь это касается ИС и ФП, которые, собственно, и обеспечивают работоспособность ВОД (рис. 3). Оценка предельных точностных возможностей аналоговых ВОД проводилась нами в составе измерительных ВО-систем [3].

На рис. 3 условно показаны: ИС — источник света для возбуждения ВС — например, полупроводниковый лазер типа ИЛПН-206 ($P_0 = 10^{-3}$ Вт, $\lambda = 1.3$ мкм), P_0 — мощность оптического потока, подводимого к ВОД, λ — длина световой волны, ВС — волоконно-оптический кабель, например, типа КВСП-50/125 с погонным затуханием $\alpha \leq 3$ дБ/км, $F(\chi)$ — измеряемая физическая величина, действующая на ВОД, ФП — полупроводниковый фотодиод, например, типа ЛФД-2 с лавинным умножением фототока (квантовая эффективность $\eta = 0.4$, коэффициент лавинного умножения $M = 20$, спектральная плотность напряжения шумов фототока на сопротивлении нагрузки фотодиода $R_n = 1$ кОм равна $(U_{ш})_{ФП} = 3 \cdot 10^{-8}$ В·Гц $^{-0.5}$).

Для упрощения анализа были приняты такие допущения:

- абсолютная стабильность (температурная, временная и пр.) всех параметров элементов измерительного тракта ВОД (ИС, ФП, ВС и пр.),
- полоса пропускания следующего за ФП электрического тракта $\Delta f = 1$ Гц.

Пороговая чувствительность ВОД — это тот наименьший прирост действующей на него измеряемой физической величины, вызывающий такой прирост его выходного сигнала, который будет однозначно воспринят на фоне шумов.

Основные составляющие шума на резисторе нагрузки ФП:

а) *шумы, обусловленные токами утечки ФД* (в первую очередь его темновым током), спектральная плотность напряжения этих шумов $(U_{ш})_{ФП}$ приводится в паспорте на ФД,

б) *фотонные шумы оптического потока*, которые обусловлены его дискретной структурой — флуктуациями плотности потока фотонов, спектральная плотность напряжения фотонных шумов $(U_{ш})_{фот}$ на резисторе нагрузки R_n :

$$(U_{ш})_{фот} = \sqrt{\frac{2e^2 P \eta}{h\nu} M^2 F(M) \cdot R_n}, \quad (1)$$

где $\sqrt{\frac{2e^2 P \eta}{h\nu} M^2 F(M)}$ — спектральная плотность шумов фототока на выходе ФД; e — заряд электрона, Кл; P — мощность оптического потока на входе ФД, Вт; η — квантовая эффективность ФД; $h\nu$ — энергия кванта оптического потока, Дж; M^2 — средний квадрат коэффициента лавинного умножения, $F(M)$ — фактор-шум неидеальности процессов лавинного умножения (для безлавинных ФД M и $F(M)$ принимают равными единице),

в) *дробовые шумы фототока I_ϕ* (шумы Шоттки), которые являются следствием дискретной структуры электрического тока и обусловлены флуктуациями плотности потока электронов, спектральная плотность напряжения дробовых электронных шумов $(U_{ш})_{эл}$ на резисторе нагрузки R_n :

$$(U_{ш})_{эл} = R_n \sqrt{2eI_\phi}, \quad (2)$$

где $I_\phi = \frac{eP\eta}{h\nu}$ — фототок, протекающий через резистор R_n ,

г) *шум Найквиста* — тепловой шум самого резистора R_n ; спектральная плотность напряжения равна

$$(U_{ш})_{Rn} = \sqrt{4kTR_n}, \quad (3)$$

д) *шумы ИС $(U_{ш})_{ИС}$* .

Спектральные плотности перечисленных шумов в широком диапазоне частот постоянны, источники этих шумов некоррелированы между собой, а поэтому их суммарная спектральная плотность равна:

$$U_{ш} = \sqrt{(U_{ш})_{ФП}^2 + (U_{ш})_{фот}^2 + (U_{ш})_{эл}^2 + (U_{ш})_{Rn}^2 + (U_{ш})_{ИС}^2}. \quad (4)$$

Запишем условие пороговой чувствительности ВОД, принимая отношение сигнал/шум в полосе частот $\Delta f = 1$ Гц равным единице:

$$\frac{\Delta P_{пор} e \eta}{h\nu} M R_n = U_{ш} \cdot \Delta f, \quad (5)$$

где $\Delta P_{пор}$ — наименьший прирост оптической мощности на входе ФП, который, будучи преобразованным в прирост его выходного сигнала (фототока), однозначно будет воспринят на фоне шумов.

Модуляционную характеристику ВОД считаем линейной:

$$p = \frac{\chi}{\chi_0} \delta, \quad (6)$$

где p — коэффициент пропускания (прозрачность) модулятора ВОД, как функция некоторой обобщенной координаты χ (параметра ЧЭ ВОД), χ_0 — такое значение обобщенной координаты ЧЭ, при котором обеспечивается наибольшая прозрачность модулятора, δ — коэффициент внутренних потерь оптического излучения в ВОД.

С учетом (6) и потерь излучения в ВО-трактах (принимая, что $l_1 = l_2 = l$), выражение для прироста пороговой мощности на входе ФП примет вид

$$\Delta P_{пор} = P_0 \frac{\Delta \chi_{пор}}{\chi_0} \delta \cdot 10^{-0.2\alpha l}, \quad (7)$$

где P_0 — мощность оптического потока на входе ВОД, Вт; $\Delta \chi_{пор}$ — пороговое изменение обобщенной координаты ЧЭ, обуславливающее пороговый прирост оптической мощности на входе ФП; α — коэффициент погонного затухания мощности оптического потока при его распространении по ВС, Дб/км; l — расстояние между ВОД и пунктом сбора информации, км.

С учетом (7) выражение (1) примет вид

$$(U_{ш})_{фот} = R_n \sqrt{\frac{e^2 P_0 \eta \delta \chi 10^{-0.2\alpha l}}{0.5 \chi_0 h\nu} M^2 F(M)}. \quad (8)$$

Учитывая (1)—(4) при подстановке (7) и (8) в (5) и выполняя необходимые преобразования, получим выражение для пороговой чувствительности ВОД:

$$\Delta\chi_{\text{пор}} = \frac{\chi_0 h\nu F(M)}{P_0 \eta \delta \cdot 10^{-0.2\alpha l}} \times \sqrt{\frac{4kTR_n + 2eIR_n^2 + (U_{\text{ш}})_{\text{ФП}}^2 + (U_{\text{ш}})_{\text{ДС}}^2}{e^2 R_n^2 M^2 F^2(M)} + \frac{P_0 \eta \delta \chi \cdot 10^{-0.2\alpha l}}{0.5\chi_0 h\nu \cdot F(M)}}. \quad (9)$$

Из выражения (9) легко получить выражение для оценки предельно достижимой минимальной погрешности измерений при посредстве аналоговых ВОД. Для этого наибольшее изменение обобщенной координаты $\Delta\chi_{\text{max}}$, обуславливающее максимальное значение сигнала на выходе ВОД, примем равным $0.5\chi_0$, а наименьшее, соответственно, $\Delta\chi_{\text{пор}}$. Тогда предельно достижимая минимальная погрешность измерения может быть представлена в таком виде:

$$\chi_{\text{пор}} = \frac{2h\nu F(M)}{P_0 \eta \delta \cdot 10^{-0.2\alpha l}} \times \sqrt{\frac{4kTR_n + 2eIR_n^2 + (U_{\text{ш}})_{\text{ФП}}^2 + (U_{\text{ш}})_{\text{ДС}}^2}{e^2 R_n^2 M^2 F^2(M)} + \frac{P_0 \eta \delta \cdot 10^{-0.2\alpha l}}{h\nu \cdot F(M)}}. \quad (10)$$

Дадим оценку шумам, обусловленным спецификой процессов генерации света в полупроводниковом лазере. Уровень шумов оценивался по выражению

$$N = -10 \lg \frac{\langle P^2 \rangle}{\langle P_0 \rangle^2},$$

где $\langle P^2 \rangle$ — средние квадратичные флуктуации мощности излучения, а $\langle P_0 \rangle$ — постоянная составляющая мощности излучения. Значение шума было постоянным в диапазоне частот до 400 МГц и при номинальном уровне мощности составило 140 Дб [13]. Пересчет этих данных в напряжение шумов на резисторе нагрузки ФД дал величину того же порядка, что и напряжение фотонных шумов оптического потока. Это означает, что использование лазерного ИС существенно не ухудшает предельных параметров аналоговых ВОД.

Оценка численных значений слагаемых, входящих в выражения (9) и (10), показала, что

$$\frac{P_0 \eta \delta \cdot 10^{-0.2\alpha l}}{h\nu \cdot F(M)} \gg \frac{4kTR_n + 2eIR_n^2 + (U_{\text{ш}})_{\text{ФП}}^2 + (U_{\text{ш}})_{\text{ДС}}^2}{e^2 R_n^2 M^2 F^2(M)}. \quad (11)$$

Учитывая (11) и пренебрегая потерями в ВО-тракте ($10^{-0.2\alpha l} \approx 1$), выражения (9) и (10) можно существенно упростить:

$$\Delta\chi_{\text{пор}} \approx \chi_0 \sqrt{\frac{h\nu F(M)}{P_0 \eta \delta}}, \quad \chi_{\text{пор}} \approx 2 \sqrt{\frac{h\nu F(M)}{P_0 \eta \delta}}. \quad (12)$$

Подставляя численные значения величин в последнее из выражений (12), получим [3]: $\gamma_{\text{пор}} \approx 10^{-6} \text{ Гц}^{-0.5}$.

Заметим, что эта оценка получена при условии выполнения ряда идеализированных допущений, которые на практике выполнить трудно, а потому реально достижимые значения γ_{min} для измерителей на основе аналоговых ВОД еще хуже [1, 2, 11, 14].

Истолкуем полученный результат. Невысокие метрологические возможности аналоговых ВОД обусловлены метрологически низким качеством оптического потока, проходящего через ВОД. Это, с одной стороны, высокий уровень его собственных (фотонных) шумов, а с другой — относительно низкий общий уровень его интенсивности. Первая из указанных причин есть следствием дискретности оптического потока как потока высокоэнергетичных фотонов и в определенной степени является следствием другой причины — малого уровня оптической мощности, вводимой в ВС от современных ИС.

Работы по усовершенствованию элементной базы ВО ведутся и, конечно, будут созданы ИС, способные обеспечить ввод в стандартные ВС существенно больших уровней мощности. Однако простое увеличение мощности в тракте ВОД не сможет радикальным образом решить проблему повышения точности измерений. Во-первых, вместе с ростом мощности оптического потока возрастает также и мощность фотонных (дробовых) шумов пропорционально корню квадратному потоку, а поэтому 1000-кратное увеличение мощности сулит лишь 30-кратное уменьшение погрешности измерения. Во-вторых, введение в ВС значительных уровней мощности вызовет появление в них нелинейных эффектов, что нарушает сам принцип работы аналоговых ВОД.

Таким образом, мы вынуждены констатировать невозможность построения измерительных устройств с аналоговыми ВОД, которые в воп-

росах точности измерений могли бы составить достойную конкуренцию традиционным (электрическим) измерительным устройствам.

Вместе с тем достоинства ВО как основы для построения ВОД не подлежат сомнениям и побуждают искать выход из создавшейся ситуации.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Поиск путей выхода из описанной ситуации привел нас к выводу о необходимости пересмотра как самих принципов формирования информативных сигналов в ВОД, так и принципов их дальнейшей (электрической) обработки [4, 5]. В результате мы пришли к осознанию необходимости отказа от аналоговых принципов измерения и перехода к неаналоговым (дискретным) принципам измерения. Реально это означает, что для повышения точности измерений с помощью ВОД необходимо в процессе модуляции ими оптического потока вводить в этот поток новые, дополнительные к оптическим, но *неоптические*, параметры, на которые и следует переложить роль реципиентов информации. Такой подход позволяет сберечь все достоинства ВО, поскольку носителем информации продолжает оставаться оптический поток. Однако при этом проблема точности измерений больше не будет связанной с принципиально низкоточными измерениями интенсивности маломощного оптического потока — она переносится из области оптических измерений в другие, неоптические области, где этой проблемы либо просто нет, либо она там решена надлежащим образом.

В общем случае неаналоговой модуляции оптического потока информация может налагаться либо на его пространственные параметры (координатная модуляция), либо на его временные параметры (импульсная модуляция).

В первом случае измерительная информация может кодироваться дискретно-пространственным (координатным) распределением параметров выходящего из ВОД оптического потока (как правило, его интенсивности).

Во втором случае информационным параметром импульсной последовательности может быть:

- число импульсов (измерение в таком случае сводится к подсчету числа импульсов, что, в принципе, можно выполнить безошибочно),

- частота поступления импульсов (измерение в этом случае сводится к подсчету числа импульсов, приходящихся на единицу времени, заметим, что измерение временных интервалов также можно выполнить с надлежащей точностью),

- временные интервалы между импульсами (измерение сводится к определению значений временных промежутков между импульсами, гарантом высокой точности измерений и в этом случае выступает возможность высокоточных измерений временных интервалов) и т. п.

Сказанное предполагает либо создание специальных, неаналоговых ВОД, либо, что иногда возможно, использование обычных аналоговых ВОД в несвойственных им неаналоговых режимах работы. В последнем случае, когда измеряемая величина может изменяться в широких пределах, можно использовать свойство некоторых аналоговых ВОД циклично изменять свой выходной сигнал. Устройством обработки сигналов таких ВОД может быть просто счетчик числа циклов, безошибочность работы которого и гарантирует высокую точность измерений.

Примером практической реализации датчиков первого типа могут быть цифровые ВОД для измерения углов поворота на основе дисковых растровых оптических модуляторов. Точность измерений в этом случае определяется точностью изготовления кодирующих дисков (пластин). Очевидное преимущество таких ВОД — простота получения результата измерений. Среди недостатков таких ВОД можно назвать:

- значительные габариты кодирующих дисков, которые тем больше, чем выше требования к точности измерений,

- малый круг физических величин, которые могут быть измерены такими ВОД (практически это только угловые и линейные перемещения и их производные).

Значительно большими функциональными возможностями обладают ВОД, выходной сигнал которых формируется в виде временной последовательности оптических импульсов.

Обработку сигналов цифровых ВОД можно (и следует) вести методами и средствами цифровой техники, что практически исключает возможность привнесения ошибки обработки сигнала. Кроме того, использование компьютерной или микропроцессорной обработки позволяет целенаправленно корректировать результаты измерений. Благодаря этому можно нейтрализовать влияние на результат измерений как естественных недостатков и несовершенств ВОД, так и погрешностей их изготовления и юстировки. Это могут быть:

- нелинейности преобразовательных характеристик,
- взаимное влияние составляющих векторных измеряемых величин вдоль разных осей чувствительности,
- неперпендикулярность осей зеркал, задающих пространственную ориентацию осей чувствительности ВОД,
- несовпадение оптических и геометрических осей ВОД и т. п.

Другими словами, имея мощный аппарат обработки сигналов, основную тяжесть интеллектуальной нагрузки в процессе измерений можно переложить из собственно ВОД на устройства обработки их сигналов. Это позволяет снизить уровень требований к самим ВОД (к тщательности их изготовления, сборки, юстировки, условиям эксплуатации и т. п.), не снижая при этом общего высокого уровня требований к качеству измерений в целом.

Изложенные соображения открывают возможность разработки ВОД нового класса для создания на их основе прецизионных измерителей, которые могли бы составить достойную конкуренцию их электрическим аналогам. В частности, для решения ряда первоочередных задач геофизики и навигации необходимы акселерометры с пороговой чувствительностью от $10^{-12}g$ и меньше. Среди таких задач можно отметить:

- экспериментальная проверка стабильности положения центра масс Земли,
- измерение параметров траектории смещения полюсов Земли,
- измерение гравитационной постоянной,
- изучение неоднородностей гравитационного поля Земли и других космических объек-

тов непосредственно с орбит их искусственных спутников с помощью малоразмерных градиентометров,

- создание бесплатформенных инерциальных навигационных систем для контроля и управления движением автономных объектов (например подводных лодок, космических летательных аппаратов) и т. п.

Из описанных в литературе можно привести пример ВОД ускорения, модулирующего интенсивность оптического потока, пороговая чувствительность которого составляет $2 \cdot 10^{-6}g$ [20]. Для ВОД ускорения, модулирующего фазу оптического потока, экспериментальные значения порогового ускорения составили $10^{-7}g$ [21].

Рекордная чувствительность $10^{-9}g$ получена в работе [17] при измерении ускорения свободного падения путем усреднения результатов измерений в интервале времени 100 с. Эти данные были реализованы благодаря использованию мобильного атомного гравиметра, размещавшегося в подземной исследовательской лаборатории с низким уровнем шумов на глубине 500 м. Пробной (чувствительной) массой гравиметра было облако охлажденных до температуры $2 \cdot 10^{-6} K$ атомов ^{87}Rb , которые под действием силы тяжести падали в вакууме в трехмерную магнитно-оптическую яму, создаваемую после адиабатического отключения лазерных лучей.

Заметим, что во всех приведенных примерах описаны лабораторные макеты измерителей, которым до реальных измерительных инструментов предстоит еще не простой путь.

Из доступных сегодня на рынке промышленных типов измерителей можно отметить, например, пьезоэлектрические акселерометры фирмы ZETLAB, например типа AP 2050, пороговая чувствительность которого $2 \cdot 10^{-3}g$ [<http://zetview.com/catalog/vibrodats/icp/sense.php>].

СХЕМАТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ С ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ПОТОКА

Результатом проделанной работы стала разработка нового класса ВОД с импульсной модуля-

цией интенсивности проходящего через них оптического потока (ИВОД) [6, 15].

Принципиальная возможность реализации высокоточных измерений линейных ускорений посредством рассматриваемого ниже прецизионного акселерометра на основе разработанного ИВОД базируется на:

возможности практической реализации высокоточных измерений временных интервалов, задаваемых оптическими импульсами,

возможности создания высокооборотной кварцевой колебательной системы,

независимости метрологических параметров акселерометра от любых нестабильностей параметров оптических и электрических элементов измерительного тракта ИВОД.

Последний пункт объясняется тем, что измеряемыми (информационными) величинами в выходном сигнале ИВОД являются не энергетические параметры оптического потока (как это имеет место в случае аналоговых ВОД), а значения величин временных интервалов, которые оптическими импульсами только задаются.

Схематическое устройство ИВОД ускорения с ЧЭ-модулятором маятникового типа приведено на рис. 4 [6]. Упругий подвес конического маятника выполнен на основе кварцевой нити, которой является ВС 1, консольно закрепленный в корпусе ИВОД. На свободном конце консоли ВС 1 закреплена инерционная масса (ИМ) 2, выполненная из магнитомягкого материала.

В рабочем режиме ИВОД маятник 2 совершает круговое вращательное движение, возбуждаемое и поддерживаемое незатухающим благодаря согласованному поочередному силовому действию на ИМ со стороны закрепленных в корпусе ИВОД электромагнитов 4. Оптическая схема ИВОД юстирована так, что при отсутствии боковых ускорений ось конического маятника совпадает с осью OZ . При этом конец ВС движется в плоскости, задаваемой пересечением взаимно перпендикулярных осей кривизны расположенных под ним цилиндрических зеркал 3. Оси этих зеркал (OY , OX и OZ) определяют соответствующие направления пространственных осей чувствительности ИВОД (OY , OX и OZ , рис. 4, а).

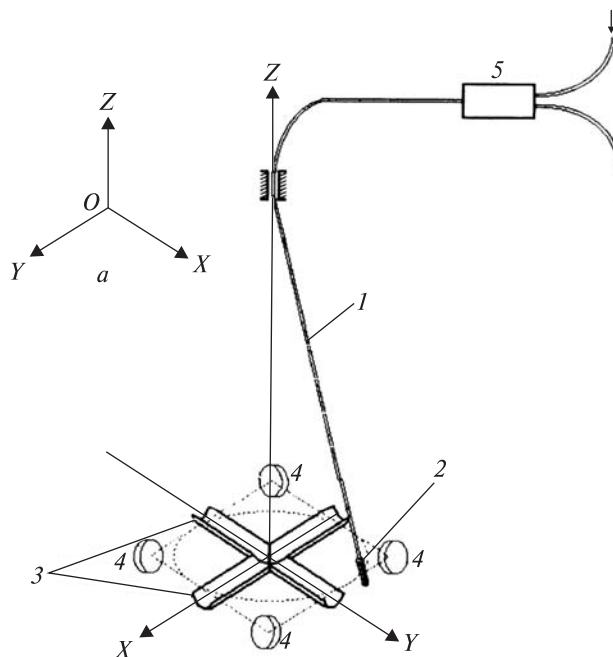


Рис. 4. Схематическое устройство ИВОД ускорения: 1 — волоконный световод, 2 — маятник, 3 — цилиндрические зеркала, 4 — электромагниты, 5 — распределитель-сумматор

Каждый раз в момент пересечения концом ВС оси кривизны какого-нибудь зеркала часть оптического потока, непрерывно истекающего из торца ВС, отражается этим зеркалом назад в ВС. Непрерывный оптический поток, входящий в ИВОД, и поток оптических импульсов, выходящий из него, разделяются с помощью Y-образного волоконно-оптического распределителя-сумматора 5.

Таким образом, выходной сигнал ИВОД представляет собой временную последовательность коротких оптических импульсов. Формально эту последовательность можно рассматривать как состоящую из двух «вложенных одна в другую» последовательностей (рис. 5), каждая из которых формируется «своим» цилиндрическим зеркалом [6].

При отсутствии боковых ускорений интервалы времени пребывания маятника по обе стороны каждой из осей зеркал будут одинаковыми (рис. 5, а). Это значит, что разность длительностей каких-либо двух соседних временных интервалов, задаваемых оптическими импульсами

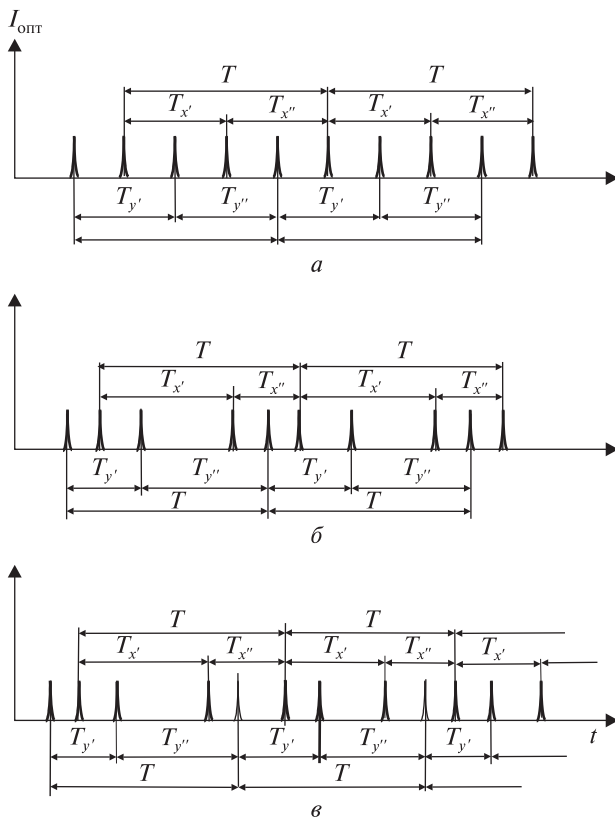


Рис. 5. Выходной сигнал ИВОД: *a* — случай $a_x = a_y = a_z = 0$, $T = T_0$, $\Delta T_x = T_{x'} - T_{x''} = 0$, $\Delta T_y = T_{y'} - T_{y''} = 0$, $\Delta T_z = T - T_0 = 0$, *б* — случай $a_x \neq a_y \neq a_z = 0$, $T = T_0$, $\Delta T_x \neq 0$, $\Delta T_y \neq 0$, $\Delta T_z = T - T_0 = 0$, *в* — случай $a_x \neq a_y \neq a_z \neq 0$, $T \neq T_0$, $\Delta T_x \neq 0$, $\Delta T_y \neq 0$, $\Delta T_z = T - T_0 \neq 0$

в каждой из их последовательностей, будет равняться нулю.

При появлении бокового ускорения описываемая концом маятника окружность смещается от своего начального положения в направлении, противоположном направлению вектора ускорения. Величина этого смещения определится величиной ускорения, действующего на ИВОД, величиной его ИМ и жесткостью подвеса маятника. Вследствие этого интервалы времён пребывания маятника по разные стороны осей зеркал уже не будут одинаковыми — один из каждой пары соседних временных промежутков, задаваемых оптическими импульсами в каждой из последовательностей, увеличит свою длительность, а другой — уменьшит (суммарная их длительность при этом, очевидно, не изменится)

(рис. 5, б). Чем большей (меньшей) будет величина бокового ускорения, тем большей (меньшей) будет и разность длительностей соседних временных интервалов в последовательностях оптических импульсов.

Именно эту разность мы и принимаем в качестве меры величины бокового ускорения ИВОД. Знак этой разности (плюс или минус) будет определять направление проекции вектора ускорения (согласно или против направления ориентации соответствующей оси чувствительности акселерометра).

При появлении ускорения, вектор которого параллелен оси *OZ*, исходное положение равновесия маятника не изменится, а значит останутся равными нулю и упомянутые выше разности. Однако при этом изменится общая длительность периода обращения маятника и изменение именно этой величины может быть принято в качестве меры величины ускорения, действующего на ИВОД вдоль оси *OZ*.

Измерение временных интервалов и определение их разностей во всех каналах («X», «Y» и «Z») акселерометра можно осуществлять путем подсчета числа высокочастотных импульсов, заполняя ими измеряемые временные интервалы [7]. Очевидно, период следования счетных импульсов должен быть высокостабильным во времени.

Таким образом, после каждого оборота конического маятника ИВОД схема обработки его сигнала выдает три числа, сопоставляя каждому из них соответствующую ему составляющую вектора ускорения вдоль каждой из пространственных осей, задаваемых зеркалами ИВОД.

Согласно принципу работы ИВОД все три отсчета (вдоль каждой из его осей чувствительности) являются нелинейными функциями соответствующих величин ускорений. Более того, действие на ИВОД ускорения вдоль оси *OZ* приводит к искажению отсчетов и вдоль других осей (при условии неизменности величин действующих ускорений). Однако при совместной обработке результатов отсчетов, можно получить неискаженные величины каждой из проекций произвольно ориентированного вектора ускорения [12].

Как следует из принципа работы акселерометра, величина абсолютной погрешности измерения является постоянной во всем диапазоне измеряемых величин ускорений и определяется дискретой его счета (периодом генератора высокой частоты).

ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АКСЕЛЕРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Для облегчения получения количественной оценки метрологических возможностей акселерометра с ИВОД примем упрощающие допущения:

- вектор силы упругости на конце маятника лежит в плоскости XOY ,
- масса консоли ВС пренебрежимо мала,
- инерционная масса является материальной точкой.

Принятые допущения позволяют рассматривать движение конца упругой консоли ВС с укрепленной на нем ИМ как движение материальной точки в плоскости XOY [16].

На рис. 6 представлена кинематическая схема ИВОД, на которой показаны силы, действующие на ИМ. Здесь: $\Phi = -ma$ — радиальная сила инерции Д'Аламбера, $\mathbf{a} = \ddot{\mathbf{r}}$ — центростремительное ускорение, $\mathbf{F}_{упр} = A\mathbf{r}$ — сила упругости консоли ВС как подвеса ИМ, $A = 3EI/L^3$ — жесткость консоли ВС, E — модуль Юнга для материала консоли ВС (кварца), $I = \pi d^4/64$ — полярный момент инерции поперечного сечения консоли ВС, $\mathbf{F}_{вн}$ — внешняя (со стороны электромагнитов 4, см. рис. 4) периодическая сила, компенсирующая потери маятником собственной энергии, $\mathbf{F}_{сопр}$ — сила сопротивления, являющаяся диссипативной силой и возникающая как реакция среды на движение маятника (при малых скоростях движения ИМ эта сила пропорциональна скорости: $\mathbf{F}_{сопр} = -\mu\mathbf{v} = -\mu\dot{\mathbf{r}}$), μ — коэффициент сопротивления среды, L, d — длина и диаметр консоли ВС, \mathbf{r} — радиус-вектор движения ИМ.

Для получения уравнения движения ИМ воспользуемся уравнениями Лагранжа второго рода. В общем случае это система уравнений, имеющих вид

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = 0,$$

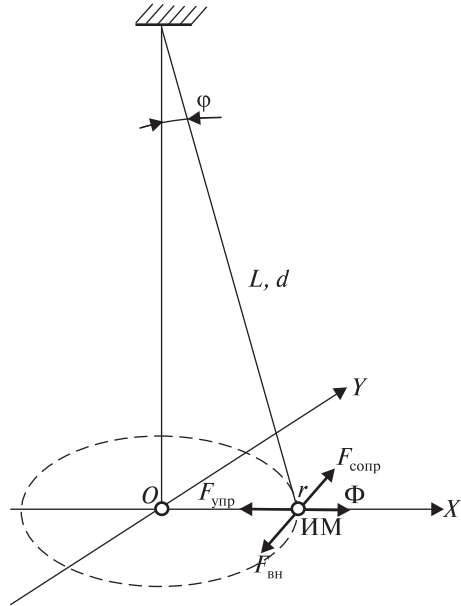


Рис. 6. Кинематическая схема ИВОД (обозначения см. текст)

где $L = T - \Pi$ — лагранжиан системы, представляющий собой разность кинетической и потенциальной энергий системы, q_j — обобщенная координата системы ($j = 1, 2, \dots$), \dot{q}_j — временная производная обобщенной координаты.

Поскольку в рассматриваемой системе наряду с потенциальными действуют также и непотенциальные силы (например силы сопротивления, тормозящие движение маятника), то уравнения Лагранжа в этом случае записываются в виде

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} + Q_j,$$

где $-\frac{\partial \Pi}{\partial q_j}$ — обобщенные потенциальные силы системы, Q_j — обобщенные непотенциальные силы системы.

В нашем случае исследуемую систему можно рассматривать как имеющую только одну степень свободы, которой является радиус обращения ИМ. Именно его и следует взять в качестве обобщенной координаты: $q_j = r$. Тогда система уравнений Лагранжа сводится к одному уравнению вида:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{r}} \right) - \frac{\partial T}{\partial r} = - \frac{\partial \Pi}{\partial r} + Q, \tag{13}$$

где $\Pi = \frac{Ar^2}{2}$ — потенциальная энергия упругой консоли ВС, конец которой смещен от положения равновесия на величину r .

Определим вид входящих в уравнение (13) выражений применительно к нашему случаю:

$$T = \frac{mv^2}{2} = \frac{m(\dot{r})^2}{2}, \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{r}} = \frac{m}{2} \cdot 2\dot{r} = m\dot{r},$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{r}} \right) = \frac{d}{dt} (m\dot{r}) = m\ddot{r}, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{m(\dot{r})^2}{2} \right) = 0,$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{Ar^2}{2} \right) = Ar; \quad Q = F_{con} = -\mu\dot{r}. \quad (14)$$

Подставляя (14) в (13), получаем уравнение движения ИМ:

$$m\ddot{r} + \mu\dot{r} + Ar = 0. \quad (15)$$

Наличие в уравнении (15) слагаемого $\mu\dot{r}$ свидетельствует о том, что рассматриваемая система диссипативна, а значит, описываемое этим уравнением движение конического маятника является затухающим. Диссипативной силой в этой системе является, в первую очередь, сила трения, обусловленная сопротивлением среды движению маятника («трение о воздух»). В некоторых случаях, например, при работе ИВОД в открытом космосе, от этой составляющей силы можно избавиться. Однако остается еще одна составляющая диссипативной силы, пусть и небольшая, но в нашем случае неунитожимая — сила внутреннего трения в материале упруго деформированной консоли ВС, возникающая в месте ее закрепления при движении маятника.

Для обеспечения незатухающего движения маятника в любых условиях эксплуатации ИВОД в его состав вводят электромагниты, расположенные так (рис. 4), что своим поочередным силовым действием ($F_{вн}$) на ИМ компенсируют потери маятником собственной энергии. В таком случае уравнение (15) приобретает полный вид:

$$m\ddot{r} + \mu\dot{r} + Ar = F_{вн}. \quad (16)$$

Вместе с тем, из сказанного выше следует, что по своему физическому смыслу, силовое действие электромагнитов уравновешивает диссипативные силы, т. е.

$$\mu\dot{r} = F_{вн},$$

что дает возможность упростить (16):

$$m\ddot{r} + Ar = 0. \quad (17)$$

Проектируя уравнение (17) на оси зеркал ИВОД (рис. 4), получим:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -Ax, & \ddot{x} + \omega_x^2 &= 0, \\ m\ddot{y} &= -Ay, & \ddot{y} + \omega_y^2 &= 0, \end{aligned} \quad (18)$$

где $\omega^2 = A/m$ — собственная круговая частота свободного вращения маятника.

Решение системы (18) в общем случае имеет вид

$$\begin{aligned} x &= C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t, \\ y &= C_3 \cos \omega t + C_4 \sin \omega t. \end{aligned} \quad (19)$$

Для определения постоянных интегрирования примем следующие начальные условия:

$$x(0) = 0, \quad y(0) = R, \quad \dot{x}(0) = V_0, \quad \dot{y}(0) = 0.$$

Учитывая их, получаем

$$C_1 = 0, \quad C_2 = V_0/\omega, \quad C_3 = R_0, \quad C_4 = 0.$$

где $V_0 = (2W_k/m)^{1/2}$ — линейная скорость движения ИМ, W_k — ее кинетическая энергия.

Подставляя постоянные интегрирования в (19), получаем

$$\begin{aligned} x &= (V_0/\omega) \sin \omega t, \\ y &= R_0 \cos \omega t. \end{aligned} \quad (20)$$

Система уравнений (20) является параметрическим заданием траектории движения ИМ. Исключив из уравнений (20) параметр t , получим уравнение эллипса:

$$\frac{x^2}{(V_0/\omega)^2} + \frac{y^2}{R_0^2} = 1. \quad (21)$$

В установившемся режиме (при условии симметрии силового действия на ИМ со стороны всех ЭМ) движение ИМ будет круговым, радиус которого может быть определен из (21):

$$R_0 = \frac{V_0}{\omega} = V_0 \sqrt{\frac{mL^3}{3EI}}. \quad (22)$$

Из (22) легко найти период обращения маятника:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{mL^3}{3EI}}. \quad (23)$$

Рассмотрим реакцию ИВОД для случаев действия на него ускорения, вектор которого в первом случае параллелен плоскости XOY (рис. 4), а во втором — перпендикулярен к ней.

В первом случае наличие пороговой величины ускорения $(a_{\text{пор}})_x$ обусловит смещение центра окружности, описываемой концом маятника, от начального положения на некоторую величину $\Delta x_{\text{пор}}$, при которой сила упругости консоли уравновесит Д'Аламберову силу инерции:

$$m (a_{\text{пор}})_x = A \cdot \Delta x_{\text{пор}}. \quad (24)$$

Принимая во внимание, что при пороговой величине ускорения $\Delta x_{\text{пор}} < R_0$, из рис. 7 выразим связь $\Delta x_{\text{пор}}$ с $\Delta t_{\text{пор}}$:

$$\Delta t_{\text{пор}} \approx \frac{T_0}{2\pi} \cdot \frac{\Delta x_{\text{пор}}}{R_0}. \quad (25)$$

Условие регистрации $(a_{\text{пор}})_x$ может быть представлено следующим образом:

$$\Delta \tau_{\text{пор}} = T = 1/f_{\text{ген}} = 4\Delta t_{\text{пор}}.$$

Здесь $\Delta \tau_{\text{пор}}$ — разность времен пребывания конца конического маятника по обе стороны оси кривизны OY цилиндрического зеркала (рис. 4), с другой стороны, $\Delta \tau_{\text{пор}}$ может быть интерпретирована как разность длительностей двух соседних временных интервалов в последовательности оптических импульсов, создаваемых этим зеркалом (рис. 5, б, частный случай: $a_x \neq 0, a_{y,z} = 0$), T и $f_{\text{ген}}$ — соответственно период и частота колебаний высокочастотного стабилизированного генератора счетных импульсов.

Из выражений (23) и (25) определим пороговую чувствительность акселерометра в направлении оси чувствительности OX :

$$(a_{\text{пор}})_x = \frac{R_0}{4f_{\text{ген}}} \cdot \left(\frac{3EI}{mL^3} \right)^{3/2} = 2\pi^3 \frac{R_0}{f_{\text{ген}} T_0^3}. \quad (26)$$

Максимальная величина ускорения вдоль оси OX , которая может быть измерена акселерометром, определится, очевидно, из соотношения

$$(a_{\text{max}})_x = \frac{3EI}{mL^3} R_0 = \frac{4\pi^2}{T_0^2} R_0. \quad (27)$$

Соответственно динамический диапазон ускорений, измеряемых вдоль оси OX , равен

$$N_x = \frac{(a_{\text{max}})_x}{(a_{\text{пор}})_x} = \frac{2}{\pi} f_{\text{ген}} \cdot T_0. \quad (28)$$

Очевидно, что все результаты, полученные для оси OX , в полной мере могут быть отнесены и к оси OY .

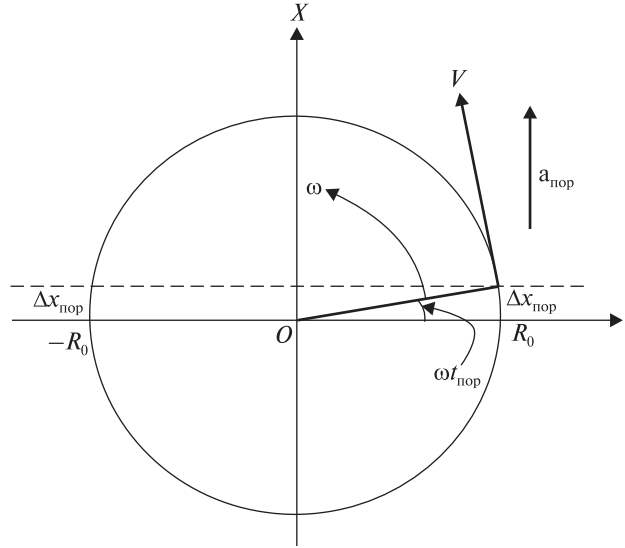


Рис. 7. К расчету реакции ИВОД при действии на него ускорения (см. текст)

Быстродействие акселерометра определяется, очевидно, периодом обращения маятника T_0 (23).

Если вектор ускорения, оставаясь параллельным плоскости XOY , изменяет свою ориентацию относительно осей OX и OY , то ненулевой результат будет получен уже в двух каналах «X» и «Y» (рис. 5, б), и полная величина вектора ускорения и его направление определится как векторная сумма величин его проекций, полученных в каналах «X» и «Y».

Следующий случай (вектор ускорения параллелен оси OZ) (рис. 5, в) принципиально отличается от только что рассмотренных, поскольку информационным параметром здесь выступает сама длительность периода обращения маятника, измеряемая в третьем, «Z»-канале акселерометра. Выражение, определяющее период обращения маятника в этом случае, имеет вид:

$$T = 2\pi \cdot \left(\frac{3EI}{mL^3} \pm \frac{a_z}{L} \right)^{-1/2}. \quad (29)$$

Знак «минус» внутри скобок соответствует случаю совпадения направления вектора ускорения с положительным направлением оси OZ .

В соответствии с выражением (29) условие регистрации порогового ускорения вдоль оси OZ будет иметь вид

$$\frac{1}{f_{\text{ген}}} = 2\pi \cdot \left[\left(\frac{3EI}{mL^3} \right)^{-1/2} - \left(\frac{3EI}{mL^3} \pm \frac{(a_{\text{пор}})_z}{L} \right)^{-1/2} \right]. \quad (30)$$

Принимая во внимание, что $\frac{(a_{\text{пор}})_z}{L} \ll \frac{3EI}{mL^3}$, и используя формулы приближенных вычислений, упростим (30):

$$(a_{\text{пор}})_z \approx \frac{L}{\pi f_{\text{ген}}} \cdot \left(\frac{3EI}{mL^3} \right)^{3/2} = \frac{8\pi^2 L}{f_{\text{ген}} T_0^3}. \quad (31)$$

При определении максимальной величины ускорения $(a_{\text{max}})_z$, которое может быть измеренным вдоль оси OZ , сталкиваемся с определенными трудностями из-за отсутствия четких физических ограничений и на саму ее величину, и на возможность ее определения. Примем в качестве $(a_{\text{max}})_z$ такую ее величину, при которой период обращения маятника уменьшится вдвое (понятно, что это условие не является жестким):

$$(a_{\text{max}})_z = 9 \cdot \frac{EI}{mL^2} = \frac{12\pi^2 L}{T_0^2}. \quad (32)$$

Соответственно динамический диапазон ускорений, измеряемых вдоль оси OZ , определится выражением

$$N_z = \frac{(a_{\text{max}})_z}{(a_{\text{пор}})_z} = \pi f_{\text{ген}} \sqrt{\frac{3mL^3}{EI}} = \frac{3\pi}{2} f_{\text{ген}} \cdot T_0. \quad (33)$$

Как видно из полученных выражений, основные метрологические параметры рассмотренного акселерометра могут быть легко изменены в широких пределах путем соответствующего выбора конструкционных параметров ИВОД и частоты генератора счетных импульсов. Так, используя для подвеса маятника стандартный ВС типа «кварц-кварц» с наружным диаметром (по кварцу) 125 мкм ($E = 7 \cdot 10^{10}$ Н/м², $I = 1.2 \cdot 10^{-17}$ м⁴) и приняв $L = 1$ см, $m = 0.1$ г, $R_0 = 2$ мм и $f_{\text{ген}} = 5 \cdot 10^7$ Гц, из выражений (23), (26)–(28), (31)–(33) получаем

$$\begin{aligned} (a_{\text{пор}})_{x,y} &= 4 \cdot 10^{-6} \text{ г}, & (a_{\text{max}})_{x,y} &= 5.0 \text{ г}, & N_{x,y} &= 1.2 \cdot 10^6, \\ (a_{\text{пор}})_z &= 2 \cdot 10^{-5} \text{ г}, & (a_{\text{max}})_z &= 75 \text{ г}, & N_z &= 3.5 \cdot 10^6, \\ & & T_0 &= 4 \cdot 10^{-2} \text{ с}. \end{aligned}$$

А приняв $L = 10$ см и $m = 10$ г (при неизменных других значениях) получим

$$\begin{aligned} (a_{\text{пор}})_{x,y} &= 1.2 \cdot 10^{-13} \text{ г}, & (a_{\text{max}})_{x,y} &= 5 \cdot 10^{-5} \text{ г}, & N_{x,y} &= 4 \cdot 10^8, \\ (a_{\text{пор}})_z &= 8 \cdot 10^{-12} \text{ г}, & (a_{\text{max}})_z &= 7.5 \cdot 10^{-3} \text{ г}, & N_z &= 9 \cdot 10^8, \\ & & T_0 &= 12.5 \text{ с}. \end{aligned}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный на основе ИВОД 3-координатный акселерометр-гравиметр имеет высокие технические характеристики. Он может стать основой бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) для космических летательных аппаратов (КЛА) [18].

Такие БИНС позволяют осуществлять:

- непосредственный контроль изменений параметров орбит или траекторий полета, вызываемых действием на КЛА сверхмалых, но длительно действующих (например, в течение всего времени полета) внешних силовых факторов (тормозное действие остатков атмосфер планет, давление «солнечного ветра» и т. п.),

- контролируемую коррекцию параметров орбит (траекторий) КЛА путем включения мало-мощных бортовых двигателей или разворачиванием «солнечных парусов» [9],

- исследование влияния контролируемых уровней микрогравитации на характер протекания различных физико-химических и биологических процессов.

Так, дрейф КЛА только под действием на него «солнечного ветра» за время его перелета от Земли до Марса, может сместить от расчетной точки его выхода на активный участок заключительной траектории полета на величину до 100 тысяч километров.

Высокая чувствительность и разрешающая способность таких измерителей позволяют также создавать на их основе градиентометры реальных конструкций (с базой в единицы метров) для исследования неоднородностей гравитационного поля Земли или других планет непосредственно с орбит их искусственных спутников, что открывает возможности практического решения ряда важных научных и технических задач.

Разработанный акселерометр может быть использован также в качестве высокочувствительного гравиметра для проведения геофизических исследований [8]. В частности, с его помощью можно:

- проводить экспериментальную проверку стабильности положения центра масс Земли или других планет,

- измерять смещение полюсов Земли,

- измерять гравитационную постоянную.

Такі гравиметри з орбіти штучно-го супутника здатні фіксувати локальні відхилення напруженості гравітаційного поля, обумовлені неоднорідностями об'ємної щільності земної кори, причиною яких може бути залягання там корисних копалин, щільність яких помітно відрізняється від середніх значень, притаманних даному регіону (наприклад, залягання руд важких металів, газу, нафти, води тощо).

Важливим застосуванням таких вимірювачів може бути моніторинг сейсмічної ситуації в застрайованих районах міст з підземним метрополітеном.

1. Гармаш В. Б., Егоров Ф. А., Коломиец Л. Н. і др. Можливості, задачі і перспективи волоконно-оптичних вимірювальних систем в сучасному приборостроєнні // Фотон-Експрес. — 2005. — 46, № 6. — С. 128—140.
2. Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Потапов В. Т., Чаморовський Ю. К. Волоконно-оптичні технології, пристрої, датчики і системи // Фотон-Експрес. — 2005. — 46, № 6. — С. 114—127.
3. Дем'яненко П. А. Предельні можливості аналогових оптичних датчиків в складі ВОС // Радиотехніка. — 1988. — № 2. — С. 88—90.
4. Дем'яненко П. А. Підвищення точності вимірювань в волоконно-оптичних системах вимірювання з оптичними датчиками // Радиотехніка. — 1991. — № 2. — С. 83—85.
5. Дем'яненко П. А. Точність вимірювань за допомогою волоконно-оптичних датчиків (проблеми і шляхи їх вирішення) // Оптоелектроніка і напівпровідникова техніка. — 1995. — Вип. 29. — С. 88—93.
6. Дем'яненко П. А., Зінковський Ю. Ф., Прокоф'єв М. І. Прецизійний цифровий акселерометр з волоконно-оптичним датчиком // Изв. высш. учеб. заведений. Радиоелектроніка. — 1997. — 40, № 1. — С. 39—47.
7. Дем'яненко П. А., Зінковський Ю. Ф., Прокоф'єв М. І. Обробка сигналів в вимірювачах з імпульсними волоконно-оптичними датчиками // Изв. высш. учеб. заведений. Радиоелектроніка. — 1998. — 41, № 8. — С. 54—60.
8. Дем'яненко П. О., Зінковський Ю. Ф., Прокоф'єв М. І. Цифровий прецизійний волоконно-оптичний гравіметр // Геодезія, картографія і аерофотознімання. — 1997. — Вип. 58. — С. 239—241. — (Кадастр, картографія, геоінформатика — сучасні технології і перспективи розвитку: Матер. I Міжнарод. науково-технічної конф., 9—14 червня 1997 р., Львів, Державний університет «Львівська політехніка»).
9. Дем'яненко П. О., Зінковський Ю. Ф., Прокоф'єв М. І. Волоконно-оптичний датчик для акселерометрів космічних навігаційних систем // Сучасні технології в аерокосмічному комплексі: Матер. IV Міжнарод. науково-технічної конф. — Житомир: Житомирський інженерно-технологічний інститут, 1999. — С. 165—168.
10. Дем'яненко П. О., Зінковський Ю. Ф. Методологічні аспекти тлумачення феномену дифракції світла // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Радиотехніка. Радиоапаратобудування. — 2008. — № 36. — С. 132—140.
11. Жижин В. Волоконно-оптичні датчики: перспективи промислового застосування // Електронні компоненти. — 2010. — № 12. — С. 17—23.
12. Зінковський Ю. Ф., Дем'яненко П. О., Прокоф'єв М. І. Вимірювальні перетворювачі на основі волоконно-оптичних датчиків // Фотон-Експрес. — 2005. — 46, № 6. — С. 181—187.
13. Моисеев В. В., Потапов В. Т. Исследование стабильности волоконно-оптического датчика «отражательного» типа // Радиотехніка. — 1988. — № 8. — С. 37—40.
14. Окоси Т., Окамото К., Оцу М. і др. Волоконно-оптичні датчики / Под ред. Т. Окоси: Пер. с япон. — Л.: Энергоатомиздат, 1990. — 256 с.
15. Пат. 2146373 Российской Федерации МКЛ G 01 P 15/08. Волоконно-оптический датчик ускорения / П. А. Дем'яненко, М. І. Прокоф'єв. — Приоритет от 02.08.95. — Выдан 10 марта 2000 г.
16. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости / Пер. с англ. под ред. Г. С. Шапиро. — М.: Наука, 1979. — 560 с.
17. Фара Т., Герлен К., Ландражен А. і др. Транспортируемый гравиметр на холодных атомах разработки LNE-SYRTE: работа в подземных условиях в режиме наилучшей чувствительности // Гроскопия и навигация. — 2014. — 86, № 3. — С. 3—14.
18. Dem'yanenko P. A., Zinkovskiy Yu. F., Prokofev M. I. Digital precision sensor of superlow accelerations // Космічна наука і технологія. — 2000. — 6, № 4. — С. 27—28.
19. Hasegawa A., Kodama Y. Guiding-center soliton in fibers // Opt. Lett. — 1990. — 15, N 24. — P. 1443—1445.
20. Soref R., McMahon D. H. Tilting-mirror fiber optic accelerometer // Appl. Opt. — 1984. — 23. — P. 486—491.
21. Spillman W. D. Multimode fiber optic accelerometer based on the photoelastic effect // Appl. Opt. — 1982. — 21. — P. 2653—2658.
22. Van As H. R. Im Gigabit-Rausch // Bus. Comput. — 1996. — N 6. — S. 81—83.
23. Webb S. M., Guild K. M., Sian S. S. 337 km unrepeated transmission at 10 Gbit/s with Raman amplification and clock prechirp // Electron. Lett. — 1996. — 32, N 9. — P. 827—829.

Стаття надійшла до редакції 12.05.14

П. О. Дем'яненко, Ю. Ф. Зиньковський

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», Київ

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ДАВАЧІ З ІМПУЛЬСНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ ОПТИЧНОГО ПОТОКУ

Досліджується проблема метрологічно низьких можливостей вимірювачів на основі аналогових волоконно-оптичних датчиків (ВОД), аналізуються її причини та обґрунтовується перехід до імпульсних (дискретних) принципів модуляції параметрів оптичного потоку в ВОД. Для цього в оптичний потік вводяться додаткові, неоптичні, параметри, на які перекладається роль реципієнтів інформації і з яких ця інформація може бути відтвореною з потрібною точністю. Розроблена схема конструкції ВОД з імпульсною модуляцією інтенсивності оптичного потоку (ІВОД), проведені метрологічні розрахунки параметрів вимірювача лінійних прискорень, побудованого на основі ІВОД.

Ключові слова: волоконно-оптичні давачі прискорення, імпульсна модуляція, волоконно-оптичні акселерометри.

P. O. Demianenko, Yu. F. Zinkovski

National Technical University of Ukraine
«Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv

FIBER-OPTIC SENSORS WITH A PULSE-MODULATED OPTICAL FLOW

We investigate the problem of metrologically low capabilities of the analog gauges on the basis of fiber-optic sensors (FOS) as well as analyze the reasons and justify the transition to the pulse (discrete) principles of modulation parameters of the optical flow in FOS. For this purpose, the additional, non-optical parameters, which shifted the role of recipient of information, and from which this information may be reproduced with the required accuracy, could be added to the optical flow. The schematic of a FOS design is developed. Metrological calculation of linear acceleration meter based on IFOS is performed and discussed.

Key words: fiber-optic acceleration sensors, pulse modulation, fiber optic accelerometers.