

Теорема сравнительной чувствительности волоконных датчиков

М.И.Беловолов, В.М.Парамонов, М.М.Беловолов

Проведен анализ чувствительности волоконных датчиков физических величин на интерферометрах различных типов. Сформулирована и доказана теорема: при времязависимых внешних физических воздействиях с ненулевыми частотами ω (т. е. кроме статических и низкочастотных) на чувствительные плечи интерферометров в виде многовитковых элементов (катушек) существуют такие длины измерительных плеч L волоконных интерферометров, при которых чувствительность датчиков на волоконных интерферометрах Саньяка может быть как сравнимой с чувствительностью датчиков на волоконных интерферометрах Майкельсона, Маха–Цендера или Фабри–Перо, так и превышать ее при прочих равных условиях (однотипные воздействия, одинаковые длины плеч и тип одномодового волокна). Обсуждены следствия из теоремы, важные для практической реализации линеек и массивов волоконных датчиков для измерительных целей и приборов со стабильными метрологическими свойствами.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, волоконный интерферометр, интерферометр Саньяка, интерферометр Майкельсона, чувствительность, функция преобразования.

1. Введение

Настоящая работа посвящена вопросу о сравнительной чувствительности волоконно-оптических датчиков различных физических величин, в которых чувствительными элементами являются многовитковые элементы или катушки из одномодового волокна, включенные в измерительные плечи волоконных интерферометров. Наиболее часто применяются волоконные интерферометры типа Фабри–Перо (рис.1,а), Майкельсона (рис.1,б) и Маха–Цендера (рис.1,в) [1–5]. В течение последних 30 лет появилось много работ по распределенным и «точечным» волоконно-оптическим датчикам, основанным на схемах волоконных интерферометров Саньяка с многовитковыми чувствительными элементами или катушками (см. работы [6–14] и ссылки в них). Однако, несмотря на разработку фундаментальных основ функционирования волоконно-оптических датчиков перечисленных выше типов, остается не ясным вопрос о том, какая из схем сможет обеспечить высокую чувствительность датчика к требуемому физическому воздействию при приемлемых метрологических характеристиках датчика или измерительного прибора.

На такой вопрос общего характера дать ответ затруднительно. Принято считать, что необходимо разрабатывать высокочувствительные датчики с использованием одной из схем волоконных интерферометров (типа Фабри–Перо, Майкельсона или Маха–Цендера, рис.1), поскольку такой выбор гарантирует высокую чувствительность, а интерферометр на основе схемы Саньяка (рис.1,з) должен служить в основном для построения гироскопов. В более конкретном виде вопросы выбора оптической

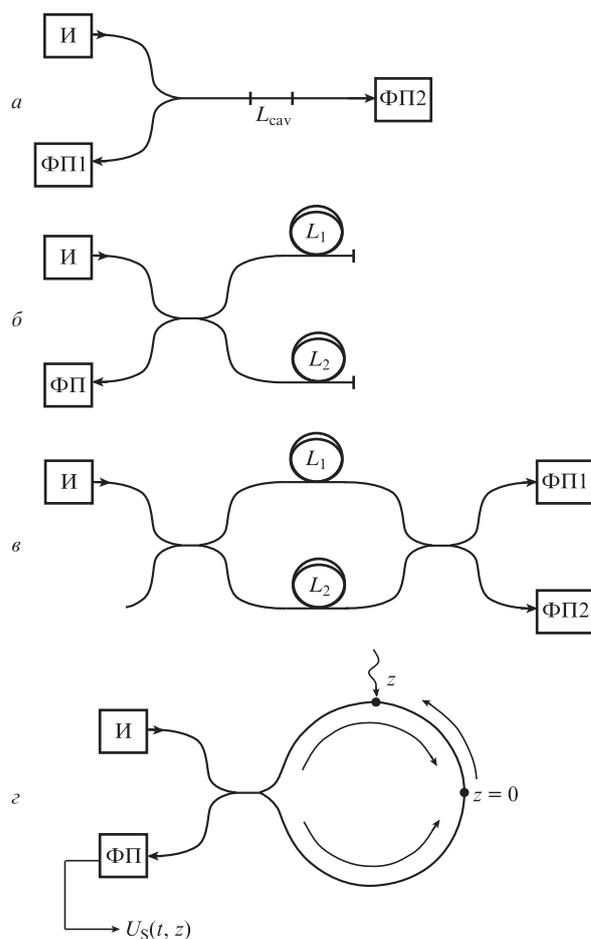


Рис.1. Наиболее распространенные схемы волоконно-оптических датчиков на основе интерферометров Фабри–Перо (а), Майкельсона (б), Маха–Цендера (в) и Саньяка (з); И – источник излучения, ФП – фотоприемник, L_{cav} – длина резонатора Фабри–Перо.

М.И.Беловолов, В.М.Парамонов, М.М.Беловолов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: bmi@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 24 октября 2017 г.

схемы для разработки волоконного датчика физической величины звучат так: какой длины должен быть одномодовый световод и какими будут ожидаемые стабильность нуля, линейность функции преобразования и возможный динамический диапазон регистрируемых физических воздействий? Формулируемая и доказываемая в настоящей работе теорема о сравнительной чувствительности волоконных интерферометрических датчиков должна с определенной степенью общности ответить на эти вопросы и облегчить выбор схемы построения волоконно-оптического датчика или распределенной измерительной системы на интерферометрических принципах. Иллюстративный материал и числовые значения параметров датчиков, в частности волоконных датчиков звука (гидрофонов), приводятся здесь для лучшего понимания сравнительной чувствительности, оценки ее значений и пояснения содержания теоремы.

Теорема о сравнительной чувствительности в виде определенного утверждения общего характера формулируется и доказывается математически строго и обосновывается физически исходя из известных свойств зависимости чувствительности волоконных интерферометрических датчиков от длины световодов L в чувствительных элементах, а также из имеющегося опыта разработки и испытаний действующих образцов волоконных датчиков и измерительных систем на их основе.

2. Основные схемы волоконных интерферометрических датчиков и исходные условия

После появления на рубеже 1980-х годов одномодовых волоконных световодов выяснилось, что они могут сохранять когерентные свойства передаваемого по ним излучения. Это важное свойство одномодовых волоконных световодов на основе кварцевого стекла SiO_2 стимулировало активные исследования и разработку различных датчиков физических величин на основе высокочувствительных схем волоконных интерферометров. Уже в 1983 г. появились обзорные работы, суммирующие опыт разработки и исследований волоконно-оптических приемников звука и гидрофонов [1, 2]. Данные о чувствительности волоконных приемников звука используются нами для иллюстрации численных соотношений чувствительностей в различных схемах датчиков. Аналогичные сравнительные величины чувствительности датчиков могут быть использованы и для других типов внешних физических воздействий. При этом не нарушается общность рассмотрения вопроса и доказательства теоремы, в которой анализируется в основном зависимость амплитуды выходного сигнала или крутизны функции преобразования (рис.2) от длины одномодового волокна L в чувствительном многовитковом элементе.

Известно, что в наиболее чувствительных датчиках различных физических величин используются одномодовые оптические волокна и интерферометры на их основе (интерферометры Фабри–Перо, Майкельсона и Маха–Цендера). По физическим принципам функционирования эти схемы волоконных датчиков эквивалентны, имеют синусоидальную функцию преобразования внешнего воздействия в выходной электрический сигнал (рис.2) и чувствительности одного порядка. Модуляция фазы интерферометра $\Delta\varphi$ преобразуется фотодиодом приемника в

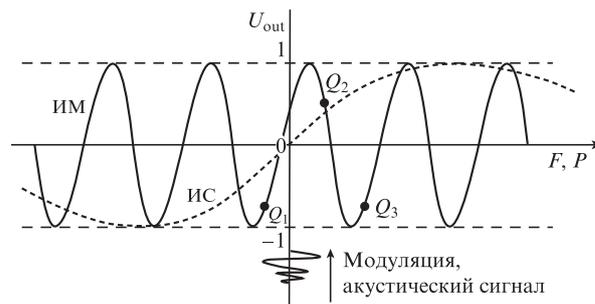


Рис.2. Качественный вид нормированных функций преобразования U_{out} волоконных датчиков на основе интерферометра Майкельсона (ИМ) и интерферометра Саньяка (ИС) от силы внешнего воздействия F или давления P ; Q_i – положение рабочей точки (к обоснованию выбора волоконного интерферометра Саньяка).

выходной электрический сигнал U_M (мВ) в соответствии с синусоидальной функцией преобразования, показанной на рис.2 в нормированном виде. Известно также, что фазовая ($\Delta\varphi$) и выходная вольтовая (U_M) чувствительности датчиков на основе интерферометров Майкельсона пропорциональны длине L волокна в измерительном плече интерферометра:

$$U_M = aL, \quad (1)$$

где a – коэффициент пропорциональности, зависящий от вида физических воздействий, внешних покрытий, геометрии намотки волокна на катушки (численные значения a можно найти в сводной табл.2 из работы [3]). В случае регистрации акустических сигналов (звукового давления) параметр $a \approx 2$ мВ/м, а уровень шума U_n аппаратуры регистрации составляет обычно 0.1–1 мВ. При амплитуде выходного акустического сигнала $U_M \approx 100$ мВ и цифровой обработке можно проводить регистрацию сигналов с отношением сигнал/шум не менее 1000 (60 дБ).

На рис.3 показаны взятые из работ [1, 2] зависимости сравнительной чувствительности волоконных датчиков звука в воде (гидрофонов) от частоты звука для разных длин L одномодовых волоконных световодов без внешних покрытий в измерительном плече интерферометра Маха–Цендера. Видно, что уже при длине одномодового световода в измерительном плече интерферометра-датчика $L = 1$ м его чувствительность находится на уровне чувствительности лучших пьезоэлектрических гидрофонов и примерно соответствует порогу слышимости человеческого уха ($\sim 2 \times 10^{-5}$ Па). При длинах одномодового световода 10, 100 и 1000 м возможно повышение чувствительности на один, два и три порядка соответственно. На практике такое увеличение чувствительности и снижение минимального порога обнаружения акустических сигналов оказывается не реализуемым, поскольку уровень технических шумов или шума моря обычно выше минимальных порогов обнаружения.

Применение в чувствительных элементах волоконных световодов больших длин приведет, в частности, к увеличению шумов, обусловленных температурными флуктуациями, вибрациями и различного рода нестабильностями, непосредственно влияющими на положение рабочей точки интерферометрического датчика, которая становится плавающей. Возможна активная стабилизация рабочей точки интерферометрического датчика, но это сложно сделать в случае большого числа датчиков в изме-

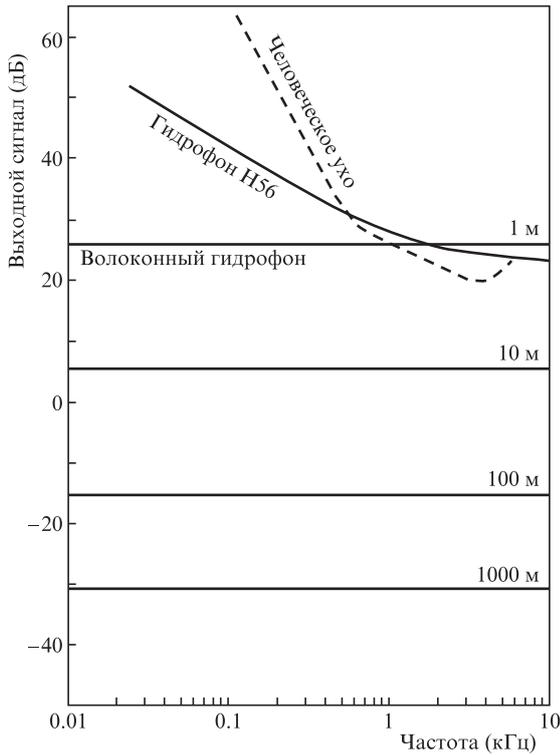


Рис.3. Сравнительная чувствительность волоконных приемников звука (гидрофонов и пьезоэлектрических гидрофонов) по отношению к чувствительности человеческого уха (взято из работ [1,2]; нормировано на 1 мкПа.

рительных системах. Таким образом, чувствительность датчиков линейно возрастает с увеличением длины L одномодового волокна в измерительном плече интерферометрического датчика в соответствии с формулой (1), и это определяет необходимость применения многовитковых элементов из одномодового волокна в виде катушек диаметром d . Диаметр акустической антенны-катушки ограничивает верхнюю частоту f_u диапазона регистрируемых звуковых частот, которая определяется условием «синфазности»: размер антенны d не должен превышать половины длины волны регистрируемых звуковых волн λ_s :

$$d < \lambda_s/2. \tag{2}$$

В идеале требуется соблюдение условия $d \ll \lambda_s/2$, чтобы точнее регистрировать фазы звуковых волн и иметь возможность создания фазированных акустических антенн для определения пеленга и координат источников звука в пространстве.

Внешние покрытия волоконных световодов и среда, в которой находятся многовитковые чувствительные элементы датчика, могут существенно влиять как на чувствительность датчиков, так и на их амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), как это показано в работе [5] для акустических приемников звука в воздушной среде. На рис.3 зависимость чувствительности от частоты звука в ряду зависимостей, полученных на одномодовых волоконных световодах на основе кварцевого стекла без внешних покрытий, не проявляется и служит в данном случае для оценки ее по порядку величины.

Очевидно, что условие синфазности в виде (2) для акустической приемной антенны диаметром d должно приводить к падению чувствительности на высоких частотах,

начиная с частоты $f_u = V_s/(2d)$, когда на размере антенны укладывается больше одного полупериода звуковой волны и происходит противофазное вычитание воздействия при одновременном действии полуволн гидростатического сжатия и разрежения. Оценки для водной среды с $V_s = 1500$ м/с и $d = 8$ см дают $f_u \approx 9.4$ кГц, и эта оценка в первом приближении не зависит от длины волокна L в чувствительном элементе датчика. Увеличение длины волоконного световода на катушке приведет к большей неопределенности в положении рабочей точки Q_i (см. рис.2) в случае использования оптических схем интерферометров Фабри–Перо, Майкельсона или Маха–Цендера. Длины плеч волоконных интерферометров Майкельсона и Маха–Цендера могут быть выравнены по длине до разности $\Delta L \leq 1$ мм, и это понизит уровень шума, связанный с флуктуациями несущей частоты излучения лазерного источника излучения и приблизит рабочую точку Q_i интерферометрического датчика к нулевому положению в пределах одного-двух периодов изменения амплитуды отклика. Однако автоматической стабилизации рабочей точки в нуле происходить без специальных мер не будет, и она останется нестабильной.

Рассмотрение основных особенностей откликов волоконных датчиков на многовитковых элементах и схемах интерферометров Майкельсона, Маха–Цендера и Фабри–Перо показало, что по принципам функционирования они близки между собой и имеют практически одинаковую функцию преобразования в виде синусоидальной функции (см. рис.2) с крутизной преобразования, одинаково зависящей от L по линейному закону (1). Линейная зависимость чувствительности, или амплитуды акустического отклика волоконных гидрофонов U_M от длины волокна L в чувствительном многовитковом элементе (катушка) изображена на рис.4. Будем использовать приведенную зависимость U_M для математического и графиче-

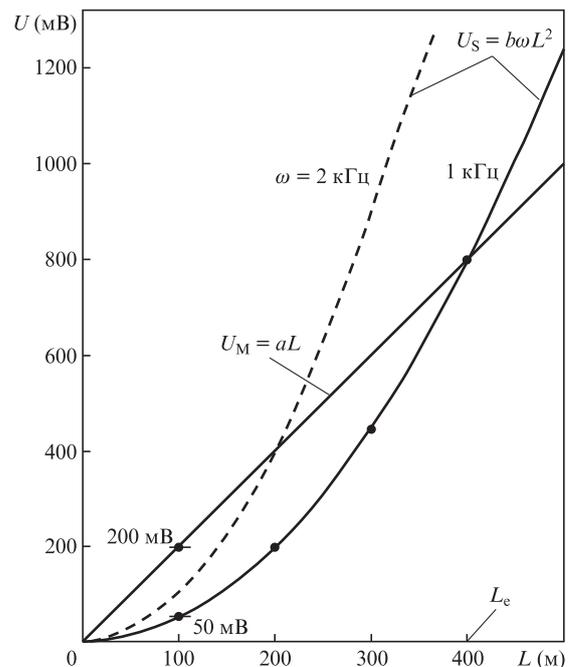


Рис.4. Зависимости вольтовой чувствительности U волоконных датчиков звука (гидрофонов) на интерферометрах Майкельсона (U_M) и Саньяка (U_S) от длины L одномодового волокна в чувствительном плече (катушке); L_e – длина волокна при равных чувствительностях датчиков (к теореме чувствительности волоконных датчиков).

ского доказательств теоремы сравнительной чувствительности, которую мы сформулируем как утверждение о соотношении чувствительностей волоконного датчика на интерферометре Саньяка и датчиков на интерферометрах Фабри–Перо, Майкельсона и Маха–Цендера в зависимости от длины L . Поскольку на практике длины волокон L в датчиках могут составлять 1–1000 м, они имеют вид многовитковых элементов или малогабаритных бухт с внешним диаметром 30–100 мм.

3. Чувствительность и АЧХ волоконных датчиков на интерферометрах Саньяка

Из всех волоконных интерферометрических датчиков (см. рис.1) выделяются датчики на волоконных интерферометрах Саньяка, которые стали популярными благодаря уникальным особенностям функционирования, связанным со стабильной рабочей точкой в нуле, линейностью функции преобразования модулирующего внешнего воздействия в выходной электрический сигнал и с большим динамическим диапазоном допустимых внешних воздействий (см. рис.2). Старт многочисленным разработкам и исследованиям волоконных датчиков на основе интерферометров Саньяка был дан работой [6], в которой определена зависимость чувствительности отклика $U_S(t, z)$ от координаты z внешнего локального физического воздействия. Последнее должно быть времязависимым (не статическим и не низкочастотным) и обладать одним дополнительным условием квазистационарности: время изменения внешнего воздействия на верхней границе полосы регистрируемых частот звука $\tau = 1/f_u$ должно быть много большим времени пробега излучения по контуру интерферометра Саньяка длиной $2L$:

$$f_u \ll c/(2\pi nL), \quad (3)$$

где c – скорость света в вакууме; n – показатель преломления материала сердцевины одномодового световода; L – длина половины волоконного контура интерферометра Саньяка.

Следуя работе [6], приведем выкладки, необходимые для понимания физики работы волоконного интерферометра Саньяка в качестве распределенного или локального датчика физических воздействий. Если z – координата акустического воздействия на одно из плеч интерферометра, отсчитанная от середины контура с нулевой координатой ($z = 0$, см. рис.1,з), то разность фаз $\Delta\varphi(t)$ интерферирующих сигналов на выходе интерферометра Саньяка будет пропорционально преобразовываться фотодиодом интерферометра в выходной электрический сигнал

$$\Delta U_S(t, z) = \Delta\varphi(t) = \varphi\left(t - \frac{L-z}{V_g}\right) - \varphi\left(t - \frac{L+z}{V_g}\right), \quad (4)$$

где $V_g = c/n \approx 2 \times 10^8$ м/с – групповая скорость распространения световой волны по сердцевине одномодового волокна. Если предположить, что сигналы наблюдаются и регистрируются обоими плечами в квазистационарном режиме (3) с частотами $f \ll f_u$, то добавки к аргументу времени t в формуле (4) являются малыми, т. е. $2z/V_g$ мало [7]. Разлагая выражение (4) в ряд Тейлора и пренебрегая членами более высоких порядков малости, получаем выражение для сигнала $U_S(t, z)$, пропорционального изменению фазы $\Delta\varphi(t)$ в интерферометре Саньяка:

$$\Delta U_S(t, z) = \left[\varphi\left(t - \frac{L-z}{V_g}\right) - \varphi\left(t - \frac{L+z}{V_g}\right) \right]. \quad (5)$$

Данная формула в виде

$$U_S(t, z) \approx \Delta\varphi_S(t, z) = \frac{2z}{V_g} \frac{d\varphi}{dt} \quad (6)$$

является основной при использовании волоконного интерферометра в качестве распределенного волоконно-оптического датчика физических величин.

Видно, что сигнал интерферометра Саньяка содержит координату z . Чтобы ее определить, можно воспользоваться, например, сигналом $U_M(t) \sim \varphi(t)$ интерферометра Майкельсона, также включенного в этот контур (см. работы [6, 8]). Метод одновременной реализации двух волоконных интерферометров на одном замкнутом контуре для определения координат физических воздействий назван методом совмещенных интерферометров [5]. Другие методы и алгоритмы определения координат внешних воздействий при использовании совмещенных интерферометров Саньяка и Майкельсона в качестве систем охраны периметров или защиты от несанкционированных воздействий можно найти в работах [6, 7, 11–13].

В данном случае нас интересует режим регистрации, когда внешнее воздействие происходит на весь контур Саньяка в виде многовиткового элемента или катушки. Для понимания физики регистрации таких воздействий, к которым можно отнести и регистрацию акустических волн волоконными гидрофонами как квазилокальными датчиками, целесообразно контур Саньяка представить в виде двух половинок, разделенных центральной точкой с координатой $z = 0$ (рис.5). Волоконные интерферометры Саньяка в виде компактной катушки с направленным X-ответвителем часто используются как отдельные датчики акустических сигналов (микрофоны или гидрофоны). При этом половину замкнутого контура необходимо изолировать от звука или сделать его существенно несимметричным по чувствительности [5]. Возникает вопрос об амплитудно-частотной характеристике такого датчика. Для получения АЧХ половины контура волоконного интерферометра Саньяка предположим, что на него воздействует акустический сигнал $A_{ac} = A_0 \sin(\omega t + \varphi)$ с акустической длиной волны $\lambda_{ac} \gg 2d$, превышающей диаметр d катушки с волокном. Проинтегрировав отклик на половине длины контура интерферометра Саньяка от нуля до L , получим общий вид отклика волоконного датчика:

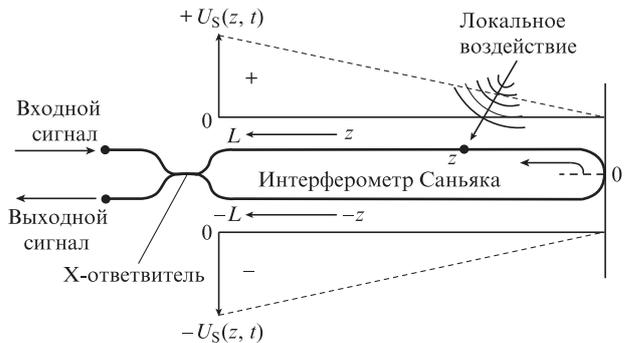


Рис.5. Волоконный интерферометр Саньяка как распределенный координаточувствительный датчик физических величин с линейной зависимостью амплитуды отклика $U_S(z, t)$ от координаты z (к выводу формулы (8) зависимости интегрального отклика $U_S(\omega, L)$).

$$U_S(t) \propto (L^2\omega/V_g)A_0\cos(\omega t + \varphi). \quad (7)$$

Видно, что амплитуда отклика пропорциональна квадрату длины волокна L^2 в контуре и линейно возрастает с ростом частоты звука ω . Следовательно, более высокие частоты звука лучше регистрируются волоконным интерферометром Саньяка как датчиком, а низкие частоты, низкочастотные вибрации и дрейфы он не воспринимает.

Нечувствительность к низкочастотным сигналам и дрейфам, как известно, благотворно сказывается на работе волоконных гироскопов. Из схемы на рис.5 понятны многие технические моменты работы как волоконных гироскопов, так и распределенных и локальных волоконных датчиков. В гироскопах, при внешних низкочастотных воздействиях на обе половины волоконного контура, важно выбрать точку с $z = 0$, сложить относительно нее два волокна контура вместе и намотать их параллельно друг другу максимально аккуратно. Любая асимметрия намотки при внешнем воздействии будет давать некомпенсированный разностный сигнал помехи и шума. Контур Саньяка становится датчиком с максимальной чувствительностью, если в нем половину контура, например с условно отрицательными амплитудами отклика (рис.5), физически изолировать от внешних воздействий. Максимальной чувствительностью будут обладать участки волоконного контура, расположенные ближе к X-разветвителю волоконной схемы. Около середины контура с $z = 0$ находятся наименее чувствительные и «глухие» участки волоконной линии. Поскольку эти участки волоконной линии или катушки-датчика дают малый вклад в интегральную чувствительность волоконного датчика, их лучше использовать в качестве подводящих волоконных каналов, не заботясь о точном определении координаты $z = 0$. При намотке катушек эти слои волокна лучше располагать на каркасах гидрофонов снизу.

Для подтверждения формулы (7), амплитудная часть которой представляет собой АЧХ волоконного гидрофона на интерферометре Саньяка, был изготовлен и исследован макет, схема которого и внешний вид показаны на

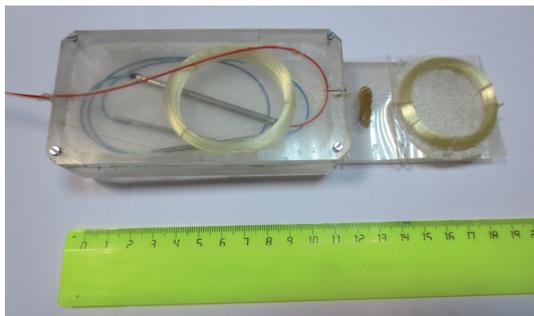
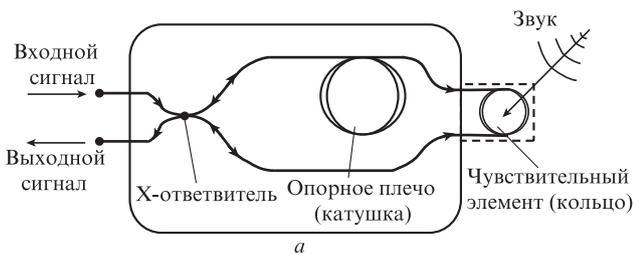


Рис.6. Оптическая схема (а) и внешний вид (б) волоконного датчика-гидрофона на интерферометре Саньяка с несимметричным по чувствительности замкнутым контуром длиной $2L = 100$ м.

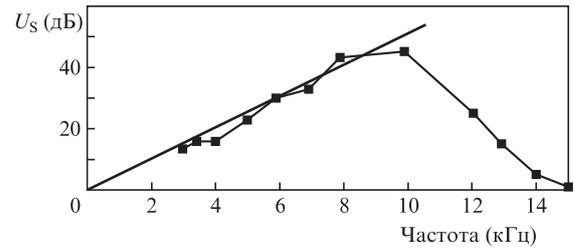


Рис.7. Пример АЧХ, снятой по «точкам», волоконного гидрофона на интерферометре Саньяка с чувствительным элементом – катушкой из одномодового волокна типа CS980 длиной 50 м и диаметром $d = 8$ см. Верхняя граница частот чувствительности $f_u = V_g/(2d) \approx 9.4$ кГц.

рис.6. Гидрофон на интерферометре Саньяка с несимметричным по чувствительности замкнутым контуром был изготовлен на одномодовом волоконном световоде длиной $2L = 100$ м. Половина контура намотана на отдельную катушку и звукоизолирована от внешней среды внутри корпуса датчика, а вторая половина контура является чувствительным сенсором-гидрофоном. Направленный X-разветвитель с делением излучения по каналам в соотношении 50/50 в соответствии со схемой на рис.6,а помещен в изолирующий контейнер-коробку.

На рис.7 приведена форма АЧХ волоконного гидрофона на интерферометре Саньяка, снятая «по точкам» в диапазоне звуковых частот 10 Гц – 15 кГц. В подтверждение формулы (7) АЧХ начинается от нулевых частот и линейно растет с ω до величин, определяемых диаметром катушки $d = 8$ см в соответствии с условием синфазности (2). Заметный спад амплитуды акустического отклика начинается с частоты $f_u \approx 9.4$ кГц. Этим экспериментом мы подтвердили линейную зависимость отклика гидрофона на интерферометре Саньяка от частоты звука ω в виде формулы (7).

В соответствии с формулой (7) для амплитуды максимального интегрального отклика U_S от всего чувствительного многовиткового элемента-датчика на интерферометре Саньяка получаем следующее выражение:

$$U_S = b\omega L^2, \quad (8)$$

где параметр b примерно равен 5×10^{-6} мВ·Гц⁻¹·м⁻² для волоконных гидрофонов из одномодового волокна. Квадратичная зависимость от L вольтовой чувствительности U_S гидрофона на волоконном интерферометре Саньяка показана на рис.4 для двух (1 и 2 кГц) тоновых частот звука ω .

4. Формулировка и доказательство теоремы сравнительной чувствительности волоконных интерферометрических датчиков

Проведенный выше анализ особенностей и принципов функционирования волоконных интерферометрических датчиков, в которых в качестве чувствительных элементов используются многовитковые элементы и катушки из одномодового волокна, позволяет сформулировать теорему сравнительной чувствительности датчиков на интерферометрах Саньяка и классических интерферометрах Майкельсона, а также Маха–Цендера и Фабри–Перо.

4.1. Теорема

При времязависимых внешних физических воздействиях с ненулевыми частотами ω (кроме статических и низкочастотных) на чувствительные плечи интерферометров в виде многовитковых элементов-катушек существуют такие длины измерительных плеч L волоконных интерферометров, при которых чувствительность датчиков на волоконных интерферометрах Саньяка может быть как сравнимой с чувствительностью датчиков на волоконных интерферометрах Майкельсона, Маха–Цендера или Фабри–Перо, так и превышать ее при прочих равных условиях (однотипные воздействия, одинаковые длины плеч и один и тот же тип одномодовых волокон). Математическим выражением теоремы сравнительной чувствительности является существование таких значений длины волоконного световода L , при которых возможно выполнение неравенства $U_S \geq U_M$ при положительных параметрах a , b и ω в формулах (1) и (8).

4.2. Доказательство теоремы

Доказательство теоремы чувствительности волоконных датчиков заключается в следующем. В связи с установленными зависимостями чувствительности U волоконных датчиков на интерферометрах Майкельсона и Саньяка в виде формул (1) и (8), независимо от численных значений параметров a и b ($a > 0$, $b > 0$) при ненулевых частотах ω внешних физических воздействий, существуют такие длины волокна L_e на чувствительных многовитковых элементах-катушках, при которых чувствительность датчиков на интерферометре Саньяка будет сравнима или равна чувствительности датчика на интерферометре Майкельсона (Маха–Цендера или Фабри–Перо): $L_e = a/(b\omega)$. При $L > L_e$ чувствительность волоконного датчика на интерферометре Саньяка может превысить чувствительность датчика на интерферометре Майкельсона. Теорема доказана с математической строгостью и общностью предположений, определяемых видом формул (1) и (8), которые устанавливают зависимость чувствительности от длины одномодового волокна на датчиках-катушках. Физическими условиями существования указанных зависимостей в виде (1) и (8) являются достаточно большие по сравнению с размерами катушек-антенн длины волн физических воздействий (условие синфазности) и условие квазистационарности (разложение по малому параметру модуляции фазы).

При $L > L_e \approx 400$ м чувствительность датчиков на интерферометрах Саньяка превышает чувствительность датчиков на интерферометрах Майкельсона (Маха–Цендера) для частоты звука $\omega = 1$ кГц. Для тоновых сигналов с $\omega = 2$ кГц амплитуда сигнала-отклика датчика на интерферометре Саньяка превысит амплитуду отклика датчика на интерферометре Майкельсона при длине волокна в чувствительном элементе-катушке 200 м. Практический смысл доказанной теоремы чувствительности заключается в том, что в случае волоконных гидрофонов длины L_e одномодового волокна, требуемого для намотки, не являются аномально большими (составляют порядка нескольких сотен метров). При использовании волоконных световодов и кабелей на их основе в качестве распределенных систем охраны и мониторинга в наземных условиях длины волоконного контура интерферометров Саньяка могут достигать 100–200 км. Время распространения оптического

излучения по контуру составляет ~ 1 мс, и это означает, что спектр частот внешних физических воздействий или звука ограничивается верхними частотами ~ 1 кГц. Такие интерферометры подходят для систем охраны от несанкционированного воздействия или для мониторинга вибраций механизмов и машин в натуральных условиях.

Недостатком волоконных датчиков на интерферометрах Саньяка является большая длина одномодового волокна, требуемая для достижения более высокой чувствительности гидрофонов по сравнению с гидрофонами на интерферометрах Майкельсона и других. Это действительно так, судя по проведенному анализу и сравнению чувствительностей датчика на интерферометре Саньяка и датчиков других типов. При длинах одномодового волокна на катушках-датчиках $L \approx 500$ м можно ожидать увеличения чувствительности гидрофонов по сравнению с чувствительностью человеческого уха или лучшего пьезоэлектрического гидрофона более чем на два порядка (см. рис.2). Такая чувствительность может оказаться излишне высокой, и подобными датчиками будет трудно пользоваться, поскольку технические шумы могут превышать пороги чувствительности. Более важной для практического использования оказывается реализация стабильной рабочей точки датчика в нуле функции преобразования, а также линейность функции преобразования и более широкий динамический диапазон допустимых внешних воздействий. Поэтому целесообразнее наматывать на катушку датчика-гидрофона одномодовое волокно не очень большой длины (20–50 м), а включать датчик следует в замкнутый контур интерферометра Саньяка повышенной длины, например 500 м или 1 км, располагая чувствительный элемент гидрофона в соответствии со схемой рис.5 ближе к направленному X-разветвлению, где амплитуда отклика максимальна. Менее чувствительную часть замкнутого контура интерферометра Саньяка можно также поместить в изолирующий контейнер, чтобы не регистрировать сигналы-помехи. В результате чувствительность гидрофона несколько уменьшится, но она может приблизиться к чувствительности пьезоэлектрического гидрофона по абсолютной величине, и этого будет достаточно, чтобы одновременно сохранить стабильную в нуле рабочую точку, линейность функции преобразования и повышенный динамический диапазон регистрируемых внешних воздействий.

На рис.8 приведены результаты экспериментов по регистрации акустических сигналов волоконными гидрофонами с длиной одномодового волокна на катушке всего 20 м при длине контура интерферометра Саньяка 1 км. Полученные экспериментально пороговые уровни регистрации акустических сигналов на частоте $\omega = 8$ кГц составляли $\sim 10^{-5}$ Па. При длине контура интерферометра Саньяка 40 м и длине чувствительного многовиткового элемента гидрофона 20 м пороговые значения регистрации звука составили около 10^{-2} Па, что подходит для некоторых технических применений гидрофонов, но не для регистрации источников звука с больших расстояний. Полученные данные о высокой чувствительности гидрофонов с небольшими длинами одномодового волокна ($L \approx 20$ м) на катушках в схемах интерферометров Саньяка косвенно подтверждают более резкую зависимость чувствительности от длины волокна L^2 в соответствии с формулой (8), чем линейный рост чувствительности в соответствии с формулой (1) в случае интерферометров Майкельсона и подобных им.

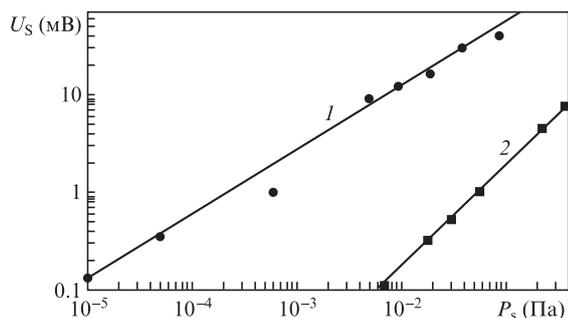


Рис.8. Экспериментальные зависимости чувствительности U_s волоконного гидрофона на катушке длиной 20 м в конце контура интерферометра Саньяка длиной 1 км (1) и 40 м (2) от силы звука P_s на частоте 8 кГц. В первом случае уровень шума в системе составляет 0.01–0.1 мВ, порог чувствительности равен $\sim 10^{-5}$ Па. Во втором случае порог чувствительности составляет $\sim 10^{-2}$ Па.

5. Следствия из теоремы и обсуждение результатов

Математическая строгость доказательства теоремы следует из функциональных зависимостей амплитуд сигналов в виде (1) и (8) при любых положительных значениях параметров a , b и ω .

Из рис.4 видно, что при небольших длинах волокна на катушках-датчиках ($L = 10\text{--}100$ м) в связи с квадратичной зависимостью амплитуды отклика от длины волокна в интерферометрах Саньяка чувствительность отклика является величиной второго порядка малости по сравнению с чувствительностью датчиков на интерферометрах Майкельсона. Однако с ростом длины волокна L амплитуды откликов гидрофонов на интерферометрах Саньяка могут быстро сравняться по абсолютной величине с амплитудами откликов датчиков на интерферометрах Майкельсона или даже превысить их. При этом сохраняются положение рабочей точки датчика на интерферометре Саньяка в нуле функции преобразования (см. рис.2), а также линейность и большой динамический диапазон допустимых внешних воздействий. Показана возможность разработки измерительных приборов для внешних воздействий с метрологически калибруемой шкалой и стабильным положением нуля. Что касается регистрации такого знакопеременного физического воздействия, как звук, то выбором одинаковой ориентации витков катушек относительно корпуса гидрофонов и согласованием по поляризации можно реализовать синфазную регистрацию акустических сигналов двумя и более практически одинаковыми датчиками-гидрофонами, которые будут работать по откликам синхронно, как одинаковые по конструкции гироскопы.

Основными физическими следствиями теоремы являются:

- Высокие абсолютные чувствительности волоконных датчиков вследствие больших длин одномодовых световодов в контурах интерферометров Саньяка $L \sim 100\text{--}1000$ м).

- Стабильное положение рабочей точки в нуле функции преобразования для волоконных датчиков на интерферометрах Саньяка.

- Линейность функции преобразования модулирующего воздействия в выходной сигнал для датчика на волоконном интерферометре Саньяка.

- Большой диапазон допустимых внешних физических воздействий на волоконный датчик Саньяка.

- Возможность создания одинаковых пар и линеек волоконных датчиков с синхронным (сфазированным) откликом; в случае регистрации тоновых и гармонических сигналов возможно определение направления на источник звука или физического воздействия из внешнего пространства.

- Возможность изготовления измерительных приборов с калибровкой по видам физических воздействий (при условии решения проблемы согласования сигналов по поляризации в волоконной схеме датчика и устранения эффекта поляризационного замирания (фединга)) вследствие стабильной в нуле рабочей точки и линейной выходной характеристики.

Отметим, что при небольших длинах волокна L волоконный датчик на интерферометре Саньяка по чувствительности будет уступать датчикам на интерферометрах Майкельсона и других типах интерферометров. При этом превосходство в чувствительности датчиков на интерферометрах Саньяка появится при длинах волокна $L \geq 400$ м (как показано на рис.4 для волоконных гидрофонов). Высоких пороговых чувствительностей ($\sim 10^{-5}$ Па при регистрации звука) можно достичь для чувствительных элементов с небольшой ($L \sim 20\text{--}100$ м) длиной волокна, если их включать в контуры Саньяка с длиной волокна 500 м – 1 км, а подключения в оптическую схему производить вблизи X-разветвителя (см. схему на рис.5 и пример на рис.8).

Выявленные и подтвержденные в настоящей работе возможности увеличения чувствительности волоконных датчиков на интерферометрах Саньяка при сохранении стабильности в нуле рабочей точки и линейности откликов являются следствием доказанной теоремы о сравнительной чувствительности волоконных интерферометрических датчиков и открывают новые возможности в разработке и создании датчиков-регистраторов и измерительных приборов различных физических величин с определенными метрологическими характеристиками, которые будут калиброваться.

1. Лямшев Л.М., Смирнов Ю.Ю. *Акустический журн.*, **29** (3), 289 (1983).
2. Бутусов М.М., Тарасюк Ю.Ф., Урванцев Н.Л. *Зарубежная электроника*, № 5, 38 (1983).
3. Кульчин Ю.Н. *Распределенные волоконно-оптические датчики и измерительные сети* (Владивосток: Дальнаука, 1999).
4. Kirkendall C.K., Dandridge A. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **37**, R197 (2004).
5. Беловолов М.И., Парамонов В.М., Туртаев С.Н. *Фотон-Экспресс*, № 6, 27 (2014).
6. Udd E. *Proc. SPIE*, **425**, 90 (1983).
7. Dakin J.P., Pearce D.A.J., Strong A.S., Wade C.A. *Proc. SPIE*, **838**, 325 (1987).
8. Chtcherbakov A.A., Swart P.L. *Proc. SPIE*, **2838**, 301 (1996).
9. Vakoc B.J., Digonnet M.J.F., Kino G.S. *Proc. SPIE*, **3860**, 276 (1999).
10. Fang X. *J. Lightwave Technol.*, **14** (10), 2250 (1996).
11. Russell S.J., Brady K.R.C., Dakin J.P. *Proc. 14-th Intern. Conf. Optical Fiber Sensors* (Viniče, Italy, 2000, paper FR 2-3).
12. Kondrat M., Szustakowski M., Palka N. *Proc. 14-th Intern. Conf. Optical Fiber Sensors* (Cuncun, Mexico, 2006, ThE5).
13. Kondrat M., Szustakowski M., Palka N., Ciurapinski W., Zyczkowski M. *Opto-Electron. Rev.*, **15** (3), 127 (2007).
14. Belovolov M.I., Belov V.S., Zykov-Myzin K.A., Orlov A.P., Gladyshev A.V., Gorskii M.A., Dianov E.M. *Proc. SPIE*, **5855**, 948 (2005).