

Математическое моделирование интерференционных сейсмодатчиков

М.Д. Лимов¹, М.Н. Осипов¹, Д.А. Гнутов¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. В работе рассматривается метод обнаружения сейсмических волн на основе интерферометра Майкельсона со сферическими волнами. Представлено теоретическое и экспериментальное обоснование применения интерферометра интегрированного в охранные сейсмодатчики. Представлена оптическая схема сейсмодатчика на основе интерферометра Майкельсона со сферическими волнами. На основании теоретических исследований показана возможность регистрации вибрационных волн на основе интерферометра Майкельсона на сферических волнах. Предлагаемая оптическая схема позволяет одновременно определять факт нарушения защищаемой территории на основе колебаний грунта. Показано, что чувствительность разработанного устройства составляет порядка $\lambda/20$.

1. Введение

Среди огромного разнообразия проблем по обеспечению инженерно-технической безопасности любого объекта одной из важных задач является защита его периметра как первого и наиболее ответственного рубежа охраны.

Основная задача периметровой охраны: обнаружить нарушителя во время подхода и преодоления линии периметра и локализовать (обезвредить) нарушителя до того, как его действия смогут нанести вред охраняемому объекту.

Объектом исследования являются системы периметровой защиты объектов информатизации и в особенности объектов критической информационной инфраструктуры. Предмет исследования: методы когерентной оптики – интерферометрия и спекл-интерферометрия – для регистрации вибрационных сигналов.

Сейсмические системы обнаружения, выделяются на фоне остальных средств защиты. Это обусловлено тем, что сейсмические датчики могут определить объект еще на стадии приближения к охраняемой территории, а не в момент проникновения, как остальные системы защиты.

Сейсмические извещатели реагируют на колебания или деформации контактирующей с ними среды, вызванные перемещением объекта. Чувствительный элемент извещателя устанавливается непосредственно в грунт и преобразует микроперемещение грунта (сейсмосигнал) в электрический сигнал, который анализируется в блоке обработки сигналов.

В настоящее время наблюдается рост интереса к сейсмическим средствам обнаружения (ССО), в связи с открывшимися возможностями извлечения информации из сейсмосигналов за счет применения новой элементной базы, в том числе мощных микропроцессоров, и новых способов

регистрации этих сейсмосигналов. Развивается так называемая "концепция сейсмических информационных полей" (СП), определяющая облик ССО ближайшего будущего. Классификация объектов сейсмического воздействия может осуществляться либо на основе анализа временной структуры сейсмосигнала, принимаемого одним преобразователем, либо на основе анализа принимаемых сигналов с нескольких СП [1].

В данной работе рассматривается метод обнаружения сейсмических волн на основе интерферометра Майкельсона со сферическими волнами.

2. Экспериментальная установка

Для реализации предлагаемого способа обнаружения сейсмических волн на основе интерферометра Майкельсона со сферическими волнами была разработана оптическая схема интерферометра, представленная на рисунке 1.

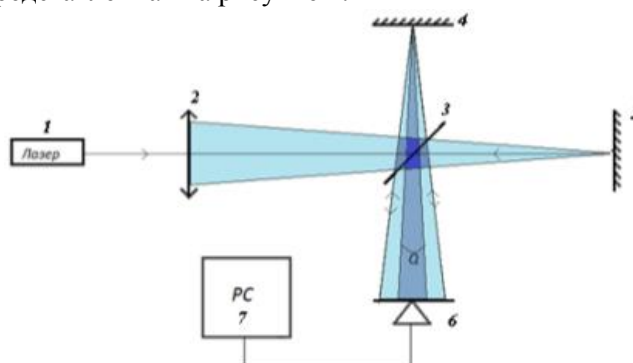


Рисунок 1. Оптическая схема интерферометра Майкельсона со сферическими волнами.

Принцип работы данной оптической схемы заключается в следующем: пучок лазерного излучения 1 после прохождения линзы 2, расщепляется надва сфокусированных когерентных пучка делительной пластинкой 3. Один из пучков фокусируется на зеркале 4, а другой фокусируется на зеркале 5. После отражения от зеркал 4 и 5, они с помощью делительной пластинки 3 накладываются, и направляются на экран, где располагается регистрирующий фотодетектор 6. Данные полученные с фотодатчика передаются на запоминающий осциллограф или персональный компьютер 7 для последующей обработки. Вид результирующей интерференционной картины представлен на рисунке 2.

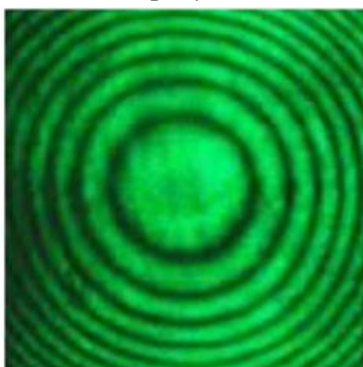


Рисунок 2. Фотография интерференционной картины.

Как видно из фотографии (рисунок 2) суммарная интерференционная картина, при наложении двух сферических волн, в случае малого угла схождения (менее 10^0), состоит из светлых и темных концентрических окружностей, частота которых также зависит от угла схождения между этими волнами.

Для эффективной регистрации смещения, необходимо выполнение следующих требований: угол схождения опорного и предметного пучков должны не более 10 градусов, а размеры точечного быстродействующего фотодетектора (6) должны быть меньше чем одна четвертая

ширины интерференционной полосы. Выполнение данного условия достигается подбором параметров оптической схемы – апертура, фокус – и подбором угла схождения между направлением опорного луча и направлением отраженного луча, сходящихся в плоскости изображения.

3. Анализ влияния сейсмических волн на выходной сигнал интерферометра

Образование и динамика интерференционных картин по предлагаемой оптической схеме. Значения вектора напряженности электрического поля на фотодетекторе для каждой отраженной от зеркал 4 и 5 волны записывается в следующем виде [2]:

$$E_1 \vec{=} E_0 \vec{=} e i(kx_1 - \omega t + \varphi); \quad (1)$$

$$E_2 \vec{=} E_0 \vec{=} e i(kx_2 - \omega t + \varphi), \quad (2)$$

где E_0 – амплитуда электрической напряженности электромагнитного поля (здесь предполагается, что в обоих пучках она одинакова); $k=2\pi/\lambda$ – волновое число; ω – круговая частота лазерного излучения; φ – начальная фаза; x_1 – оптический путь опорного пучка от делителя 3 до зеркала 4 и от зеркала 4 до фотоприемника 6; x_2 – оптический путь предметного пучка от делителя 3 до зеркала 5 и от зеркала 5 до фотоприемника 6.

Так как фотоприемник регистрирует только интенсивность, то распределение интенсивности в интерференционной картине запишем в следующем виде [3]:

$$I(x,t) = |(E_1 \vec{=} + E_2 \vec{=})|^2 \approx 2E_0^2 \{1 + \cos[k(x_1 - x_0 \pm 2\Delta r(t))]\} \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что изменение интенсивности в интерференционной картине на входе фотодетектора преобразуется в изменение выходного напряжения фотодетектора, которое записывается следующим образом [16]:

$$u(t) = A + B \cos(\varphi(0) + \varphi(t)), \quad (4)$$

где $u(t)$ – выходное напряжение электрической схемы фотоприемника; A – выходное напряжение смещения, которое связано со средней интенсивностью интерференционных полос; B – амплитуда полезного выходного напряжения, которое определяется параметрами оптико-электронной схемы; $\varphi(0)$ – начальное значение разности фаз между опорным и объектным пучками в плоскости регистрации, оно может меняться, но остается постоянным во время измерений; $\varphi(t)$ – изменение фазы, которое связано с изменением оптического пути при динамических смещениях исследуемой поверхности.

Из анализа формул (3) и (4) следует, что выходной сигнал с фотодетектора меняется от максимального значения $u(t) \max$ до минимального $u(t) \min$ или наоборот.

На осциллограммах, представленных на рисунках 3 и 4, видно, как меняются значения выходного сигнала, при регистрации сейсмических волн.

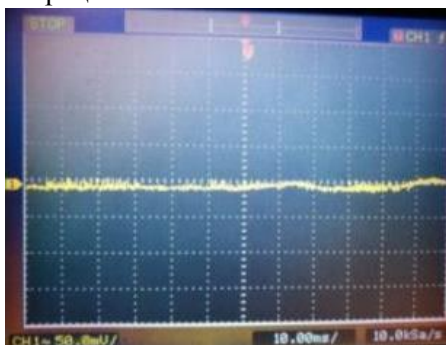


Рисунок 3. Осциллограмма $u(t)$ при наличии только шумов.

Исходя из представленных осциллограмм, чувствительность разработанного устройства составляет порядка $\lambda/20$, то есть, при использовании лазера с длиной волны $\lambda=532$ нм, чувствительность составляет порядка 26 нм. Для повышения чувствительности необходимо использовать фотодетекторы с усилением выходного сигнала. Диапазон частот, измеряемый разработанным интерферометром, лежит от 0 Гц до 10 кГц. Расширение диапазона измеряемых частот зависит от выбора фотодетектора.

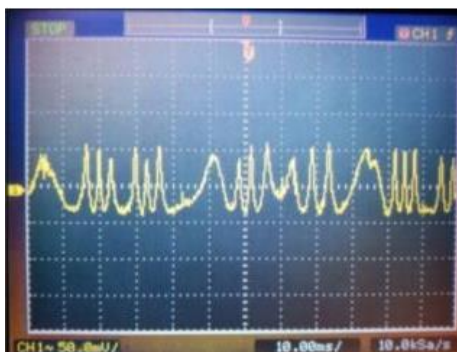


Рисунок 4. Осциллограмма $u(t)$ при регистрации вибрационных волн.

4. Заключение

Таким образом, теоретические и экспериментальные исследования показали возможность регистрации вибрационных волн на основе интерферометра Майкельсона на сферических волнах. Подчеркнем еще раз, что предлагаемая оптическая схема не предъявляет жестких требований к расположению оптических элементов.

5. Литература

- [1] Рекомендации по использованию технических средств обнаружения, основанных на различных физических принципах, для охраны огражденных территорий и открытых площадок [Электронный ресурс] / Министерство внутренних дел Российской Федерации Главное управление вневедомственной охраны ФКУ НИЦ «Охрана», Москва, 2012 // Режим доступа: <http://uvomvd01.ru/attachments/category/250/%D0%A0%2078.36.026-2012.pdf>.
- [2] Франсон, М. Оптика спеклов / М. Франсон. – М.: Мир, 1980. – 172 с.
- [3] Хохлов, В.В. Теоретико-экспериментальная разработка лазерного микрофона на основе спекл-интерферометрии / В.В. Хохлов. – Самара: СамГУ, 2014. – 72 с.

Mathematical modeling of the interference seismic sensor

M. Limov¹, M. Osipov¹, D. Gnutov¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. The paper discusses a method for detecting seismic waves based on a Michelson interferometer with spherical waves. A theoretical and experimental rationale for the use of an interferometer integrated into security seismic sensors is presented. The optical scheme of a seismic sensor based on a Michelson interferometer with spherical waves is presented. Based on theoretical studies, the possibility of registering vibration waves based on Michelson interferometer on spherical waves is shown. The proposed optical scheme allows you to simultaneously determine the fact of violation of the protected area on the basis of ground vibrations. It is shown that the sensitivity of the developed device is of the order of $\lambda / 20$.