

О возможности использования прибора «Аксолотль» в задачах мониторинга сейсмической и вулканической активности

Чечекин А.В.¹, Агафонов К.А.¹, Башкатов Д.С.¹, Марусов С.Е.¹, Чечекин В.А.²

The possibilities of using the «Axolotl» device in monitoring seismic and volcanic activity

Chechekin A.V., Agafonov K.A., Bashkatov D.S., Marusov S.E., Chechekin V.A.

¹ Конструкторское бюро «Синергия», г. Санкт-Петербург;

e-mail: achechekin@synergy.ru, kagafonov@synergy.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, г. Санкт-Петербург

Коллективом конструкторского бюро «Синергия» был подготовлен демонстрационный образец прибора для обнаружения и классификации активных действий в акватории – устройство, основанное на распространении лазерного импульса в оптоволоконной петле и способное быть детектором ранней сейсмической и вулканической активности.

Введение

Распределенные волоконно-оптические датчики находят широкое применение в задачах мониторинга протяженных объектов, таких как трубопроводы, железнодорожные пути и охраняемые периметры. Одним из наиболее перспективных типов таких датчиков является датчик, принцип работы которого очень близок интерферометру Саньяка [1], который характеризуется высокой чувствительностью, доступностью компонентной базы и простотой оптической схемы.

В данной статье рассказывается о демонстрационном образце, созданном коллективом КБ «Синергия», и о перспективах его использования в различных предметных областях, в первую очередь, там, где требуется раннее обнаружение низкоамплитудных колебаний, свидетельствующих о ранних стадиях развития фиксируемого физического процесса, например – в сейсмологических исследованиях, в задачах непрерывного мониторинга вулканической активности, где востребованы пространственно-распределенные сенсорные системы, не требующие значительных финансовых инвестиций. Коротко, в силу ограничений на общий объем материала, рассказывается о перспективах модификации прибора, позволяющих улучшить ряд характеристик. Модификация включает использование второго источника лазерных импульсов и оптического мультиплексирования, что позволяет улучшить пространственное разрешение и снизить влияние шумов. Также проводится сравнение предложенного прибора с системами распределенного акустического зондирования (DAS), что позволяет обосновать его преимущества и перспективы применения.

Принципы устройства «Аксолотль»

В основе работы прибора лежит принцип интерференционной суперпозиции двух лазерных импульсов, распространяющихся навстречу друг другу по оптоволоконной петле. Любая внешняя модуляция (внешнее механическое воздействие) меняет статистические характеристики регистрируемого на фотодетекторе светового импульса, что дает возможность эффективно решать задачи по обнаружению и классификации внешнего, по отношению к оптоволокну, колебательного процесса. Принципиальная схема используемой оптоволоконной петли представлена на рис. 1.

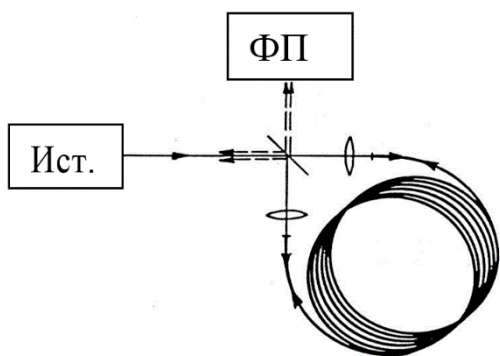


Рис. 1. Оптоволоконная петля прибора «Аксолотль».

На рис. 1 представлены в соответствующих обозначениях: Ист. – источник лазерных импульсов; ФП – лавинный фотодетектор; оптическими линзами представлен разделитель (сплиттер) оптического импульса, выполняющий разделение энергии импульса на две части; оптоволоконная петля. После выполнения процедуры оцифровки оптического импульса мы можем наблюдать специальный сигнал – рефлектограмму – максимум которого (рис. 2) соответствует оптоволоконной петле. Временная развертка этого максимума позволяет получить полную сигнатуру («портрет») внешнего воздействия (рис. 3).

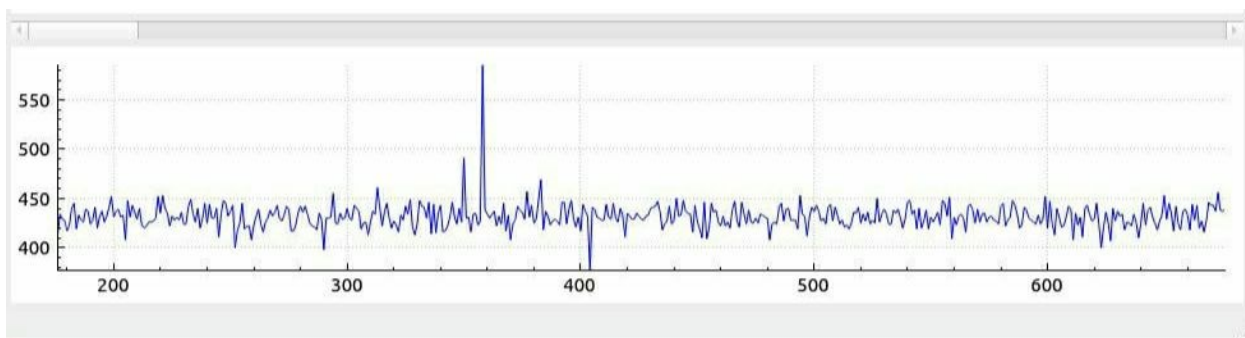


Рис. 2. Рефлектограмма прибора «Аксолотль» с максимумом на петле.



Рис. 3. Временная развертка максимума рефлектограммы при внешнем воздействии.

На представленных иллюстрациях наглядно показано, что приведенная оптоволоконная схема может быть хорошим детектором внешних колебаний. Коллективом КБ данная схема была применена, в первую очередь, для обнаружения активности судов на поверхности акватории, но эксперименты со средами, в которых вибрационные колебания распространяются весьма устойчиво, свидетельствуют о том, что данный сенсор вполне успешно может быть применим в задачах сейсморазведки и мониторинга вулканической активности.

Преимущества прибора на основе оптоволоконных петель по сравнению с DAS

1) Экономическая эффективность.

Одним из ключевых преимуществ прибора на основе оптоволоконных петель является его экономическая эффективность. В отличие от систем DAS, которые требуют использования дорогостоящих высокоточных лазеров и сложных систем обработки сигналов, наш прибор использует более доступные компоненты:

- источник световых импульсов: в качестве источника может быть использован недорогой лазерный диод, что значительно снижает стоимость системы;
- оптоволоконные петли: стандартное оптоволокно, применяемое в телекоммуникациях, является относительно дешевым и доступным материалом.

Это делает предложенное решение более привлекательным для широкого круга применений, включая мониторинг сейсмической активности в удаленных или труднодоступных регионах.

2) Простота конструкции и эксплуатации.

3) Устойчивость к внешним воздействиям.

4) Гибкость применения.

Прибор на основе оптоволоконных петель может быть адаптирован для различных задач:

- сейсмический мониторинг: регистрация землетрясений, вулканической активности и других геофизических процессов;
- контроль инфраструктуры: мониторинг состояния трубопроводов, мостов и других объектов;
- научные исследования: изучение волновых полей и их взаимодействия с окружающей средой.

Модификация оптоволоконного прибора с использованием второго источника лазерных импульсов и оптического мультиплексирования

Для повышения точности локализации источника внешних колебаний в оптоволоконном приборе на основе интерферометра Саньяка предлагается модификация [2-4], включающая использование второго источника лазерных импульсов и оптического мультиплексирования. Такая модификация позволяет улучшить пространственное разрешение и точность определения координат источника колебаний за счет увеличения количества независимых измерений и снижения влияния шумов.

Ожидается, что модифицированный прибор позволит достичь точности локализации источника колебаний до 5 м при общей протяженности сенсорного волокна 50 км. Это является улучшением по сравнению с традиционными системами, где точность составляет около 25-50 м.

Применение оптоволоконного прибора для мониторинга активности вулкана

Мониторинг активности вулканов является важной задачей для предотвращения катастрофических последствий извержений. Традиционные методы мониторинга, такие как сейсмометры и GPS-датчики, имеют ограничения по охвату и чувствительности. Оптоволоконные приборы на основе петель Саньяка предлагают решение для мониторинга вулканической активности, обеспечивая высокую чувствительность и возможность распределенного контроля.

Преимущества оптоволоконного прибора для мониторинга вулканов:

- 1) высокая чувствительность: оптоволоконные петли способны регистрировать даже слабые сейсмические колебания, что особенно важно для раннего обнаружения изменений в активности вулкана;

2) распределенный мониторинг: прибор может быть развернут на большой территории, охватывая склоны вулкана и прилегающие районы;

3) устойчивость к экстремальным условиям: оптоволоконные петли устойчивы к высоким температурам, влажности и химически агрессивным средам, что делает их идеальными для использования вблизи вулканов;

4) экономическая эффективность: использование одного оптоволоконного кабеля для нескольких петель снижает стоимость системы по сравнению с традиционными методами.

Для эффективного мониторинга активности вулкана предлагается следующая схема размещения прибора: вулкан делится на несколько зон, каждая из которых контролируется отдельной петлей Саньяка, например:

- зона кратера: петля, расположенная вблизи кратера, регистрирует непосредственную активность вулкана;

- зона склонов: петли, размещенные на склонах, контролируют движение лавы и оползни;

- зона подножия: петли в этой зоне регистрируют сейсмическую активность, связанную с движением магмы в глубине.

В итоге, данные от всех петель передаются в центральный узел, где они анализируются в реальном времени. Это позволяет оперативно реагировать на изменения в активности вулкана.

Ожидаемые результаты

Использование оптоволоконного прибора «Аксолотль» для мониторинга активности вулкана позволяет:

- проводить раннее обнаружение изменений в активности вулкана;
- вычислять точное определение местоположения источника сейсмических колебаний;
- сократить количество ложных срабатываний за счет анализа данных от нескольких петель.

Список литературы

1. Малыкин Г.Б. Эффект Саньяка. Корректные и некорректные объяснения // Успехи Физических Наук. 2000. Т. 170. № 12. С. 1325-1349.
2. Чобан Т.В., Жирнов А.А., Степанов К.В. и др. Распределенный датчик акустических воздействий на основе интерферометра Саньяка с опросом по методу «нулевых частот» // Фотон-Экспресс. 2021. № 2. С. 14-17.
3. Huang J., Chen Y., Peng H. et al. A 150 km distributed fiber optic disturbance location sensor with no relay based on the dual-Sagnac interferometer employing time delay estimation // Optics Communications. 2021. V. 479. Art. 126420. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126420>
4. Song Q., Zhou P., Peng H. et al. Improved localization algorithm for distributed fiber optic sensor based on merged Michelson-Sagnac interferometer // Optics Express. 2020. V. 28. № 5. P. 7207-7220. <https://doi.org/10.1364/OE.384728>