

УДК. 621.438

Исмаилов Д.А., Жумалиев К.М., Алимкулов С.А.,  
Кулиш Т. Э., Альбрехт А. С.  
Институт сейсмологии НАН КР,  
г. Бишкек, Кыргызстан

## ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКЛ – ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В СЕЙСМОЛОГИИ

**Аннотация.** В статье представлена методика измерения смещения поверхности Земной коры на основе обработки аэрокосмических изображений.

**Ключевые слова:** голографическая интерферометрия, сейсмология, перемещение земной коры, спекл – интерферометрия.

## СЕЙСМОЛОГИЯДА СЕПКИЛ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯСЫН КОЛДОНУУ

**Кыскача мазмуну.** Макалада аэрокосмостук сүрөттөрдү иштетүүнүн негизинде жер кыртышынын бетинин жылышын өлчөөнүн ыкмасы берилген.

**Негизги сөздөр:** голографиялык интерферометрия, сейсмология, жер кыртышынын кыймылы, сепкил интерферометриясы.

## APPLICATION OF SPECKLE INTERFEROMETRY IN SEISMOLOGY

**Abstract.** In the article a method for measuring the displacement of the Earth's crust surface based on the processing of aerospace images is presented.

**Keywords:** holographic interferometry, seismology, crustal displacement, speckle interferometry.

Голография в сейсмологии представляет собой инновационное направление, которое позволяет улучшить методы исследования и анализа сейсмических данных. В частности, применение голографических технологий может значительно повысить точность и детализацию получаемой информации, что важно для понимания сейсмических процессов и прогнозирования землетрясений. К основным направлениям применения голографических методов в сейсмологии можно отнести следующие:

1. Интерференционные методы, позволяющие исследовать мелкие изменения в структуре горных пород под воздействием сейсмических волн. С помощью голографической интерферометрии можно визуализировать деформации земной коры, возникающие при прохождении сейсмических волн, что даёт возможность более точно изучать процессы, происходящие в земной коре [1].
2. Голографические методы могут быть использованы для создания трёхмерных изображений подповерхностных структур на основе данных сейсмической томографии. Это помогает геофизикам лучше интерпретировать сложные структуры, такие как разломы, тектонические плиты, и зоны субдукции, что критически важно для оценки сейсмической опасности [2].
3. Голография позволяет значительно улучшить качество сейсмических изображений за счёт устранения шумов и искажений, возникающих при традиционных методах обработки данных. Это способствует получению более точных данных о строении земной коры [2].
4. Голографические запоминающие устройства могут быть использованы для хранения большого объёма сейсмических данных. Такие устройства обладают высокой плотностью записи информации и устойчивостью к внешним воздействиям, что делает их идеальными для долгосрочного хранения данных [3].

5. С использованием голографических методов можно одновременно записывать и анализировать несколько сейсмических сигналов, что ускоряет процесс сбора данных и их обработки [2].

В лаборатории «Информационные технологии» Института сейсмологии НАН КР ведутся работы по внедрению результатов исследований в области голографии в сейсмологии. В этой статье предложен метод для определения перемещений поверхности земной коры.

Голографическая интерферометрия в последние годы стала мощным инструментом для изучения микро- и нано перемещений в различных научных областях, включая сейсмологию. Её высокая чувствительность к деформациям позволяет детектировать даже самые незначительные изменения в земной коре, что может служить ранним предупреждением о потенциальных землетрясениях. Однако, для успешного применения голографической интерферометрии в сейсмологии необходимо оптимизировать инструментарий, учитывая специфику геофизических задач.

Оптимизация инструментария для ГИ в сейсмологии является актуальной задачей, решение которой позволит существенно повысить эффективность исследований в этой области. Сочетание современных оптических технологий, высокопроизводительных вычислений и новых методов обработки данных открывает широкие перспективы для развития голографической интерферометрии как инструмента для раннего предупреждения о землетрясениях.

Предложенная нами методика измерений перемещений является одним из разновидностей голографической интерферометрии – спекл интерферометрия [4].

В методах спекл-интерферометрии исследуемые объекты в различные моменты времени регистрируются на фотоматериале в виде спекловых полей и для получения информации об изменениях объектов (смещение, деформация, амплитуда и частота вибраций и т. д.) между экспозициями в дальнейшем их подвергают интерференционному сравнению. Например, чтобы измерить плоское перемещение объекта, пластинку экспонируют дважды - один раз до перемещения и один раз после него. В результате когерентно-оптической обработки фотоснимка смещение может быть представлено в виде картины интерференционных полос. На рисунке 1 приведена оптическая схема записи фотоснимков исследуемого объекта. Линза с фокусным расстоянием  $F$  и диаметром  $D$  образует изображение поверхности объекта в плоскости фотослоя, которое промодулировано случайной картиной спеклов. Размер спеклов  $s$  определяется апертурой линзы:

$$S = 1.22 \lambda l / D, \quad (1)$$

где  $\lambda$  - длина волны лазерного излучения и  $l$  - расстояние от линзы до фоторегистрирующей среды. На рисунке 2 представлена схема когерентно-оптической обработки фотоснимка. Пластинку помещают в сходящийся лазерный пучок, образованный линзой с фокусным расстоянием  $F$ , т. е. данная линза осуществляет Фурье-преобразование фотоснимка исследуемого объекта. Распределение интенсивности в задней фокальной плоскости линзы характеризует изменения в объекте между двумя экспозициям

Методы спекл-интерферометрии обладают высокой чувствительностью, однако, необходимость двукратного экспонирования спекл-структуры на фотопластинке предполагает использование трудоемких и длительных фотографических процессов обработки спеклограмм, что не дает возможности оперативного проведения измерений. В настоящее время имеется возможность применения иных регистрирующих сред, из которых наиболее перспективными являются оптоэлектронные системы на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС).

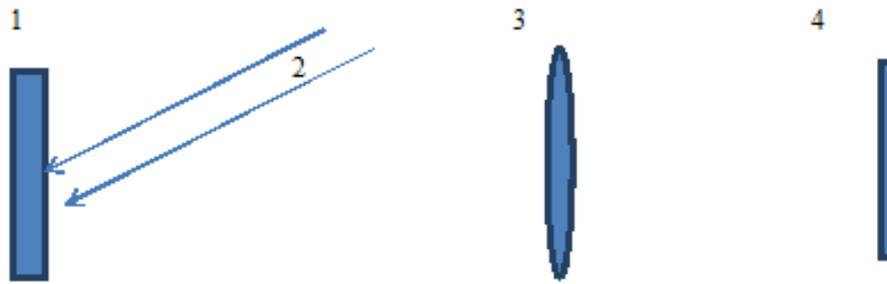


Рисунок 1. Оптическая схема записи спекл картин. 1-объект, 2-лазерный луч, 3-линза, 4-фоторегистрирующая среда.

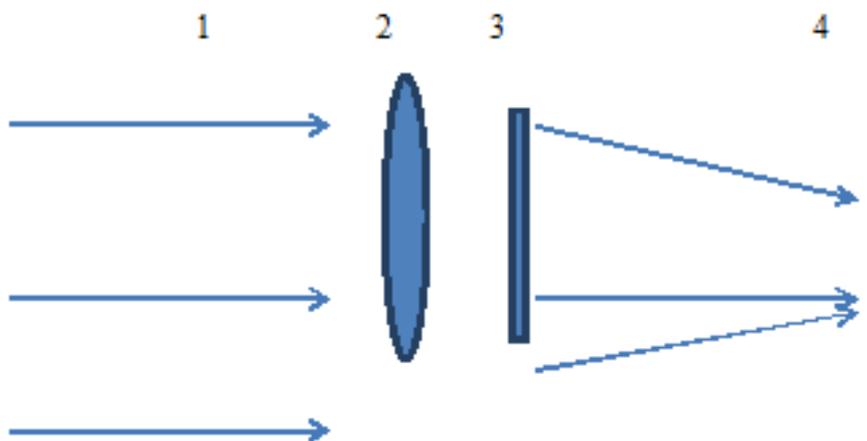


Рисунок 2. Схема когерентно-оптической обработки спекл фотоснимка. луч лазера, 2-линза, 3-фотоснимок, 4-задняя фокальная плоскость.

Применение ПЗС позволит оперативно производить запись картины спеклового поля в виде цифровой информации и сохранять результат в памяти ЭВМ для проведения дальнейших вычислений и, при наличии соответствующего программного обеспечения, автоматизировать проведение измерений. На рисунке 3 приведена одна из спеклограмм, а на рисунке 4 интерференционная картина смещений. Интерферограмма получена по методу спекл-фотографии после соответствующих обработок в среде Matlab.

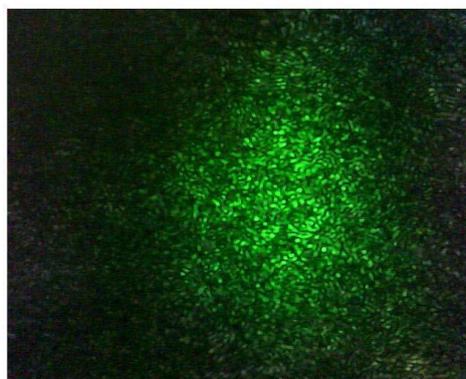


Рисунок 3. Спекл-фотография исследуемого объекта.

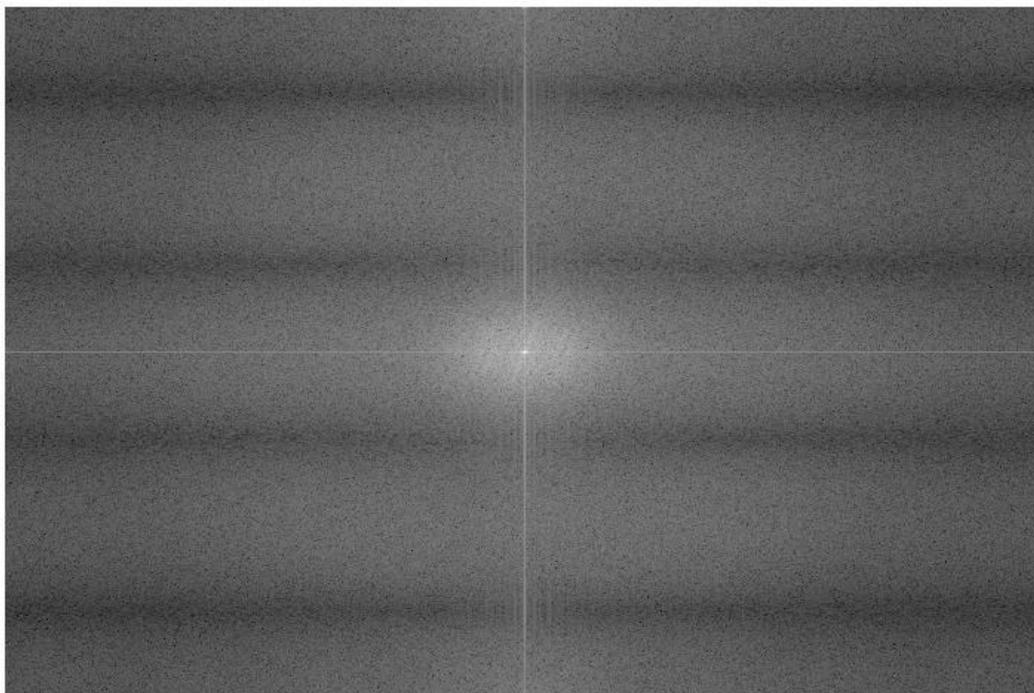


Рисунок 4. Интерферограмма смещений объекта после обработки в среде Matlab.

Для наглядности использования спекл – интерферометрии в сейсмологии, нами проведено моделирование смещения поверхности Земли на фотографии, заснятой с помощью БПЛА (рисунок 5).



Рисунок 5. Фотография местности, заснятой с помощью БПЛА.

На рисунке 6 приведена интерферограмма смещений поверхности Земли на 5 пикселей, на рисунке 7 - на 1 пиксель, а на фотографии 8 - на 2 пикселя.

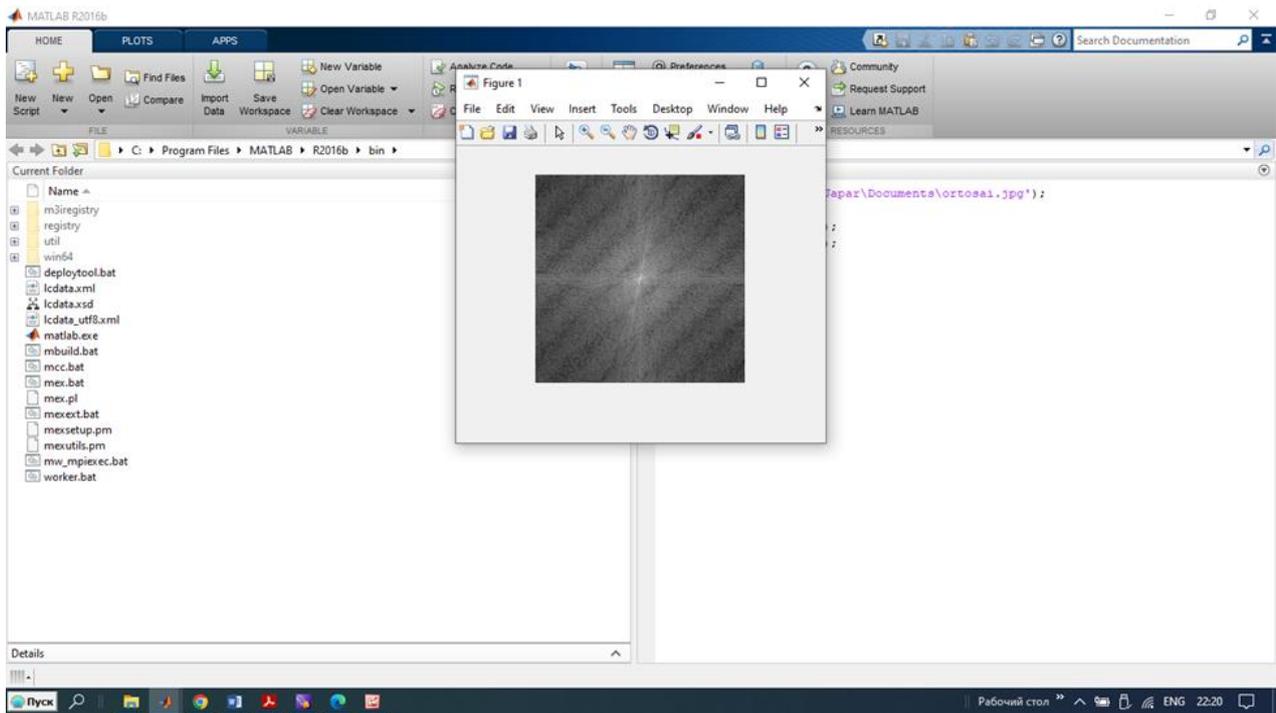


Рисунок 6. Интерферограмма смещений на 5 пикселей поверхности Земли.

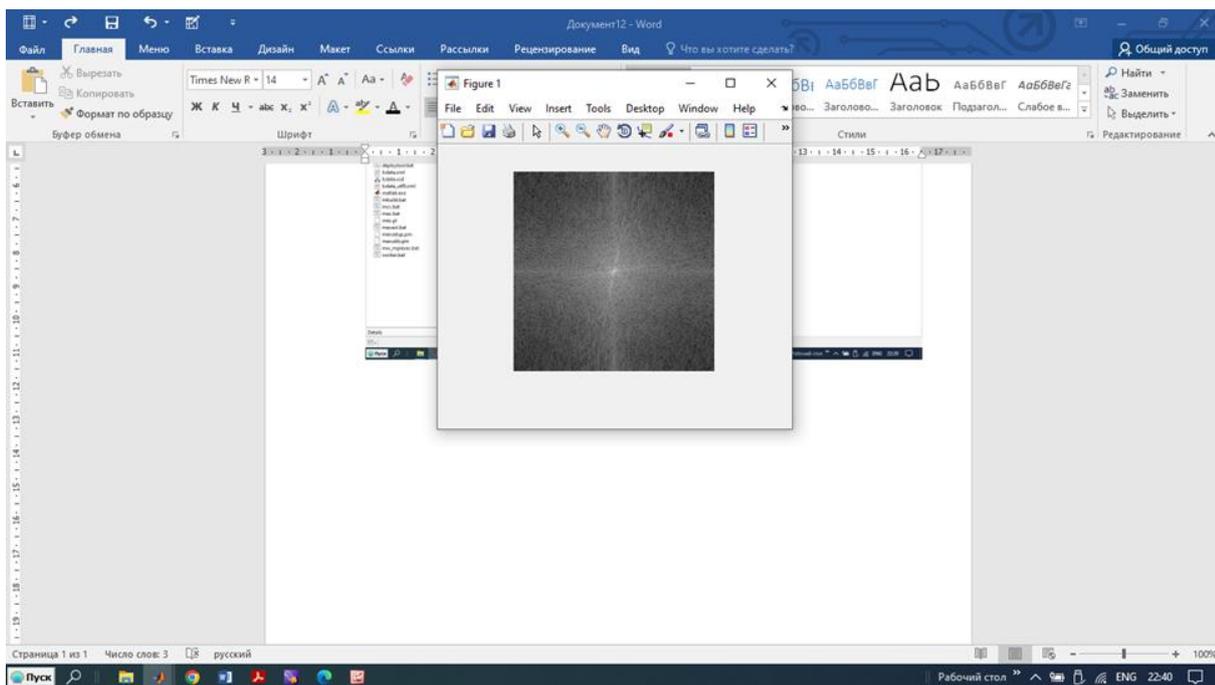


Рисунок 7. Интерферограмма смещений на 1 пиксел поверхности Земли.

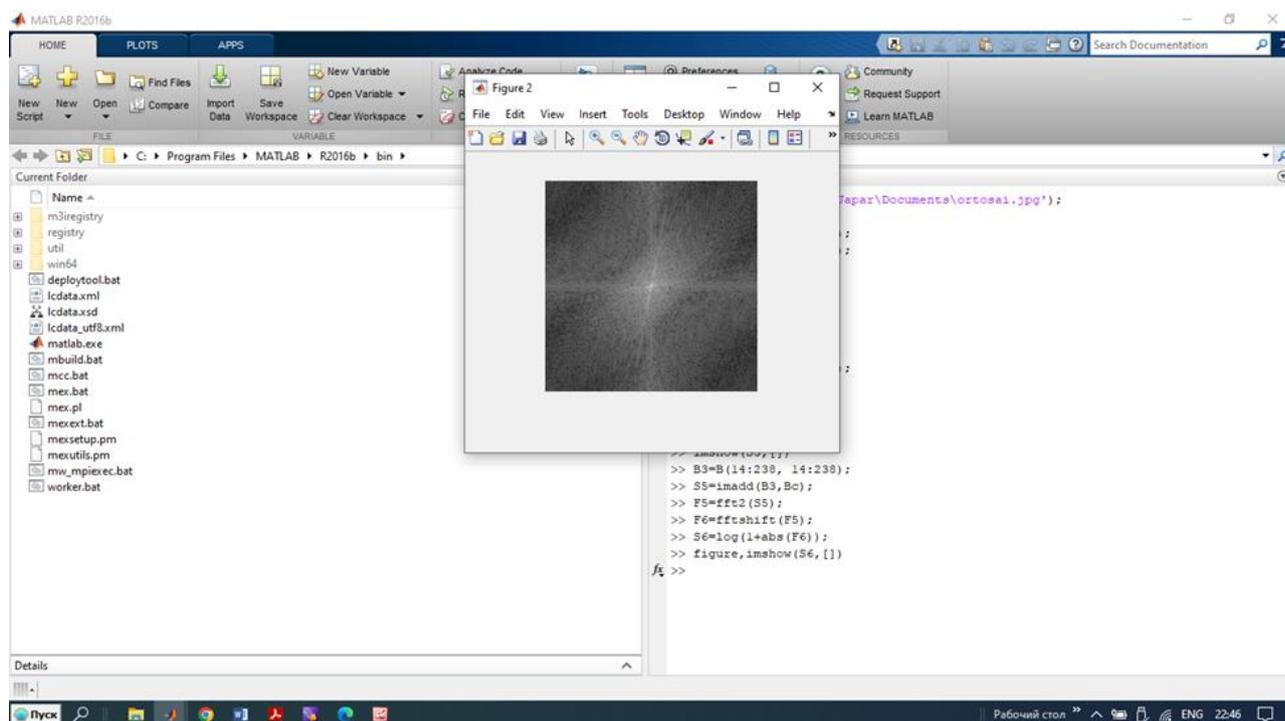


Рисунок 8. Интерферограмма смещений на 2 пикселя поверхности Земли.

### Заключение

Голография в сейсмологии представляет собой инновационное направление, которое позволяет улучшить методы исследования и анализа сейсмических данных. В частности, методы спекл – интерферометрии позволяют определить смещения поверхности Земли с точностью до одного пикселя аэрокосмических изображений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шокин Ю.И., Потапов В. П., Попов С. Е., Гиниятуллина О. Л. Спутниковая радарная интерферометрия: информационно-вычислительные аспекты. Вычислительные технологии Том 21, № 1, 2016.
2. Тимошин Ю. В., Бирдус С.А., Мерций В. В. Сейсмическая голография сложнопостроенных сред. – М.: Недра, 1989. – 255 с.
3. Акаев А., Gurevich B., Gurevich S., Zhumaliev K. Mutual connection of characteristics of holographic memory devices with by-page recording // Proc. SPIE. - 1997. - Vol.3109, pp. 205 - 212.
4. Исмаилов Д. А. Измерение перемещений методом спекл-интерферометрии. Журнал: Физика, 2015. -№1.- С.110-114.

Рецензент: д. ф.-м.н. Исманов Ю.Х.