

УДК 550.8.01

DOI: 10.52531/1682-1696-2023-23-4-152-155

*Научная статья*

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ М-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ С ЧАСТОТНОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕЙСМО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В СЛОИСТОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

А.С. Кудинов<sup>1</sup>,  
 В.С. Потылицын<sup>1</sup>,  
 Д.А. Алексеев<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ<sup>2</sup> МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
 ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)<sup>3</sup> ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ  
 ИМ. О.Ю. ШМИДТА РАН

В статье приведен анализ и математическое моделирование частотно-манипулированного сигнала, кодированного М-последовательностью с использованием многослойной модели подлежащего грунта. Показано, что данный вид сигналов показывает соотношение сигнал/помеха порядка 1.17 на поверхности земли и при наличии углеводородной залежи на глубине 1000 м.

**Ключевые слова:** моделирование, кодирование, частотная манипуляция, корреляционная функция

Задача повышения эффективности сейсморазведки с использованием импульсных и вибрационных источников является актуальной на сегодняшний день. В мировой практике лишь 30% процентов пробуренных скважин, по данным сейсморазведки, дает полезный продукт. Задача повышения вероятности продуктивного бурения может решаться одновременным использованием нескольких методов обнаружения совместно с повышением эффективности существующих. В данной работе предлагается использовать М-последовательности для повышения соотношения сигнал/помеха регистрируемого на поверхности земли. Использование сигналов с псевдослучайным коди-

*Original article*

## STUDY OF THE POSSIBILITY OF USING M-SEQUENCES WITH FREQUENCY SHIFT KEYING TO SIMULATE THE SEISMIC- ELECTRIC EFFECT IN A LAYERED GEOLOGICAL ENVIRONMENT

D.S. KUDINOV<sup>1</sup>, V.S. POTYLITSYN<sup>1</sup>,  
 D.A. ALEKSEEV<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY<sup>2</sup> MOSCOW INSTITUTE OF PHYSICS AND  
 TECHNOLOGY (NATIONAL RESEARCH  
 UNIVERSITY)<sup>3</sup> INSTITUTE OF PHYSICS OF THE EARTH  
 NAMED AFTER. O.YU. SCHMIDT RAS

The article analyzes and mathematically models the use of a frequency-shift keyed signal coded by M-vibration using a multilayer model of the underlying soil. This type of signal has been shown to exhibit a signal-to-noise ratio of about 1.17 at the earth's surface and in the presence of hydrocarbon layers at a depth of 1000 m.

**KEYWORDS:** modeling, coding, frequency shift keying, correlation function

рованием широко применяется в различных сферах, таких как навигация, радиосвязь и помехоустойчивое кодирование. Известны работы, описывающие использование М-последовательностей для нужд связи [1, 2] и сейсморазведки [3, 4]. Авторы в данных работах используют фазовую манипуляцию и кодоимпульсную манипуляцию с пассивным «0». Это дает положительный эффект, однако учитывая, что обычно подстилающая поверхность является слоистой средой, будут наблюдаться переотражения и скачкообразное изменение фазы сигнала на 180°, что приводит к эффекту многолучевости и при свертке взаимнокорреляционной функции крайне низкому значению сигнал/помеха. Использование кодоимпульсного кодирования позволяет решить эту проблему, однако приводит к длительному времени наблюдения на точке.

В данной работе предлагается использовать частотную манипуляцию, так как она исключает данные недостатки. Скачки фазы никак не сказываются на частоте сигнала, а по опыту работ лучше всего распространяются в грунте сигналы на частоте 60–200 Гц [5]. Авторы данной работы уже имеют опыт использования кодирования сейсмических колебаний как для сейсмической связи [6], так и для поиска углеводородов [7].

Для проверки возможности использования псевдослучайного кодирования вибрационной сейсморазведке, а также сейсмоэлектрическом методе проведения математическое моделирование распространения сигнала с частотной манипуляцией на несущей частоте 80 Гц и с девиацией частоты 10 Гц на слоисто-неоднородной среде моделирующей условия реального геологического разреза. В качестве расчетной модели использована модель георазреза, включающая в себя 5 слоев, основанная на данных разведочного бурения на Минусинском полигоне (ГЕОТЕК Сейсморазведка) [8]. В данной модели слои идут в следующей последовательности (песок, супесь, песчаник, известняк, аргиллит). Характеристики данных материалов показаны в табл. 1, а на рис. 1 схема разреза модели геологической среды и размеры слоев. В табл. 1 приведена послойная модель георазреза с характеристиками.

Для проведения математического моделирования рассматривались различные варианты модуляции (манипуляции). Амплитудная манипуляция в условиях неоднородной среды и различного затухания в слоях из разных горных пород обладает наименьшим потенциалом к помехозащищенности. Использование фазовой манипуляции затруднено наличием отражающих слоев, где при отражении от границ раздела слоев происходит скачок фазы на 180°, что затрудняет детектирование сигнала, особенно при использовании двоичной фазовой манипуляции. Авторами проведено математическое моделирование с использованием сигналов с фазовой манипуляцией и M-последовательностей с базой вплоть до 4095 элементов на слоистой модели геологической среды. Не было получено удовлетворительных результатов.

Следовательно, использование фазовой манипуляции в неоднородных средах по мнению авторов проекта является нецелесообразным. Применение частотной манипуляции является наиболее предпочтительным, так как в данном случае искажения, вносимые в излучаемый сигнал меньше и данный вид манипуляции является наиболее помехозащищенным в неоднородной среде.

Таким образом, была сгенерирована M-последовательность с 255 элементами. Автокорреляционная функция данной M последовательности приведена на рис. 2.

Для кодирования логического «0» используется частота 70 Гц, а логической единицы – 90 Гц. Данные частоты выбраны на основе экспериментальных работ по организации сейсмического канала связи [5], так как они имеют наименьшее затухание и лучше распространяются в такого рода неоднородных средах. M-последовательность приведенная выше использована в качестве модулирующего сигнала для частотной

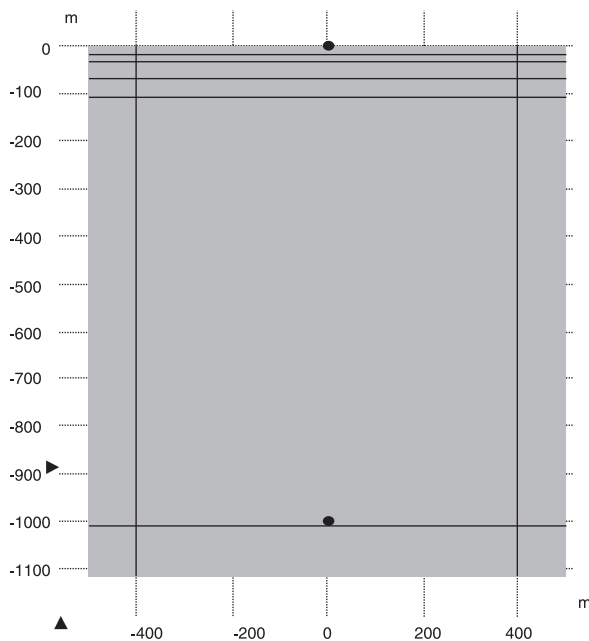


РИС. 1.  
Внешний вид послойной модели георазреза

ТАБЛИЦА 1.

Параметры послойной модели георазреза

Слой	Границы слоя	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Кoeffициент Пуассона	Модуль Юнга, Па	Пористость
Песок	0 м – -5 м	2000	0.1	10 <sup>9</sup>	0.35
Супесь	-5 м – -15 м	1900	0.3	1.5 × 10 <sup>9</sup>	0.3
Песчаник	-15 м – -30 м	2700	0.174	23 × 10 <sup>9</sup>	0.25
Известняк	-30 м – -110 м	2320	0.2	30 × 10 <sup>9</sup>	0.3
Аргиллит	-110 м – -1000 м	2700	0.3	45 × 10 <sup>9</sup>	0.1

манипуляции. Автокорреляционная функция итогового сигнала приведена на рис. 3.

Длительность одного элемента результирующего сигнала составила 15 мс, следовательно, при использовании М-последовательности длиной 255 элементов общая длительность сигнала составила 3.825 с. Внешний вид взаимокорреляционной функции между частотно-манипулированным сигналом, который излучается и регистрируется на глубине 1000 м, представлен на рис. 4. На данном графике компенсирована временная задержка для удобства анализа графика.

Полученные результаты показывают, что наблюдается пик взаимокорреляционной функции (ВКФ) со значением 0.14 и примерным соотношением сигнал/шум порядка 1.17. Это показывает, что частотно-манипулированные сигналы проходят сквозь 5-слойную модель геологической среды без значительных искажений. Значение ВКФ и соотношение сигнал/шум получено при прямом преобразовании входного сигнала, при подаче данного сигнала на частотный детектор, итоговое значение получится в разы больше. Полученный результат говорит о принципиальной возможности использования такого рода сигналов для нужд сейсморазведки.

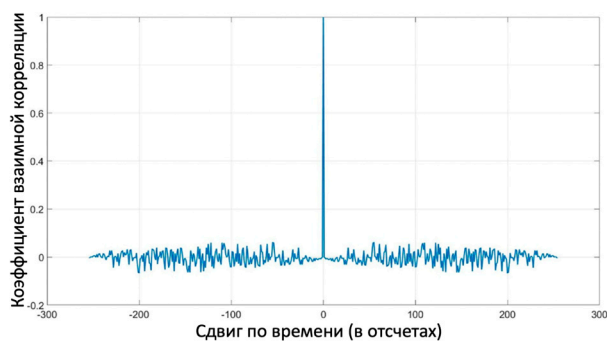


РИС. 2.

Автокорреляционная функция М последовательности из 255 элементов

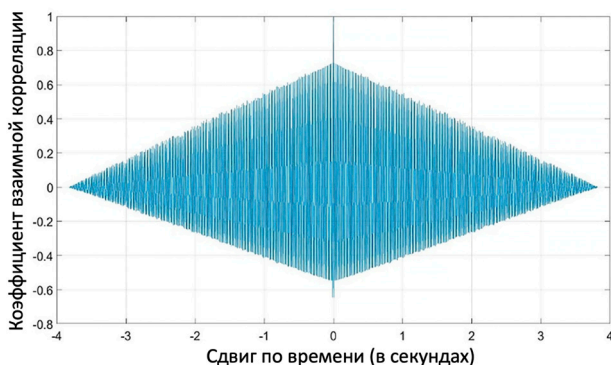


РИС. 3.

Автокорреляционная функция частотно-манипулированного сигнала

На рис. 5 приведена взаимокорреляционная функция между излучаемой М-последовательностью, состоящей из 1023 элементов и принятым сигналом, отраженным от нижней границы раздела сред на глубине 1000 м после прохождения частотного детектора. Общая длительность М-последовательности равна 15.345 с. Для удобства отображения компенсирована задержка отраженного сигнала равная 1.56 с.

Как видно из графика, пиковое значение корреляционной функции составляет 0.18, а среднее значение фонового шума не превышает 0.03, что дает соотношение сигнал/помеха равное 6. Такое значение отношения сигнал/помеха является приемлемым для сейсморазведки. Данное математическое моделирование требует проверки на реальных геологических разрезах с разведанной структурой для уточнения расчетов, однако уже полученные результаты показывают принципиальную возможность реализации такого рода систем для поиска полезных ископаемых.

Таким образом, полученные результаты моделирования показывают, что даже при использовании М-последовательности из 1023 элементов возможно регистрировать сигналы, отраженные на глубине 1 км на многослойной модели геологического разреза. Полученные результаты требуют дополнительных исследований и уточнений, так как в данной модели не учитывались различного рода неоднородности (пустоты, водяные слои и др.), которые могут вносить существенные искажения в отраженный сигнал.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта № 22-27-20103.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **КАНЕВСКИЙ В.Ф.** Кодирование гармонических сигналов в невзрывной сейсморазведке троичными и ортогональными последовательностями // Геофизический журнал. 1996. Т. 18. №. 4. С. 78.
2. **МАТВЕЕВ Д.В., Смирнов А. И., Латыпов К.Ф.** Применение М последовательности в системах связи как метод повышения помехоустойчивости / Научные исследования и разработки. 2016. С. 733–738.
3. **ПЕТРИЕВА О.В.** Анализ частотно-временных корреляционных последовательностей сложных сигналов. кодовая последовательность хаффмена (М-последовательности) // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 8(3). С. 76–81.
4. **ШАЙДУРОВ Г.Я., Романова Г.Н., Щитников А.А., Кохонькова Е.А., Кудинов Д.С.** Системы беспроводной связи и сигнализации через горную породу на электромагнитных и сейсмических волнах. Litres. Litres, 2023.

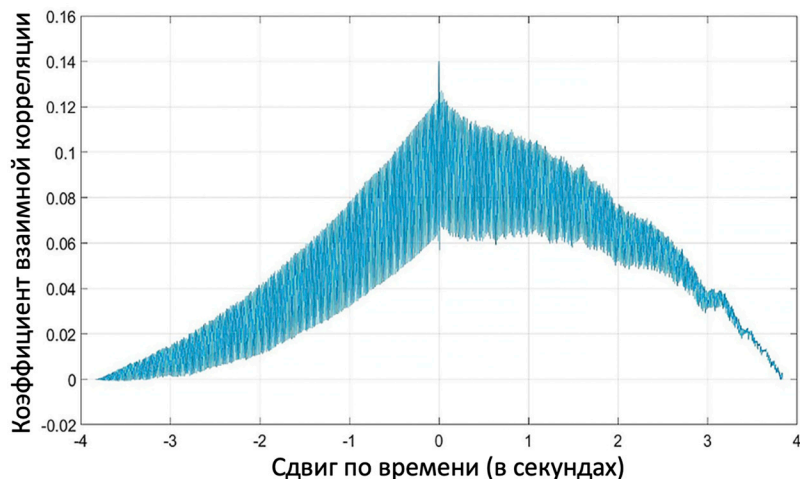


Рис. 4.

Взаимокорреляционная функция между излучаемым сигналом и регистрируемым в точке  $x = 0, y = -1000$  м

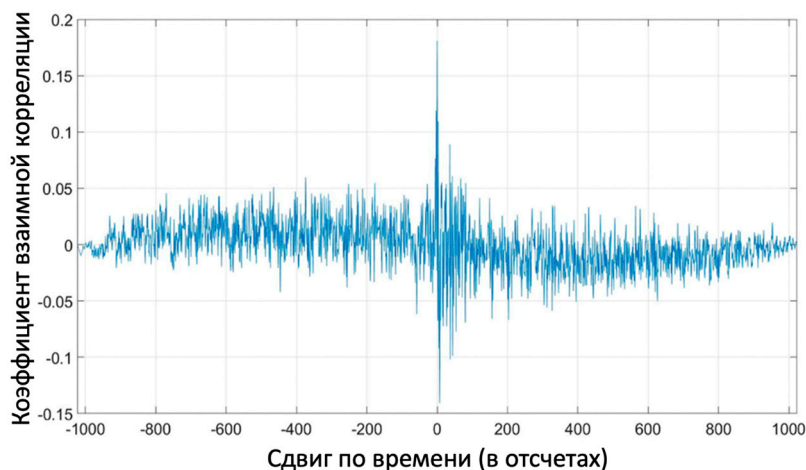


Рис. 5.

Взаимокорреляционная функция между излучаемым сигналом и сигналом, отраженным от нижней границы на глубине 1000м в точке  $x = 0, y = 0$  м

5. ШИТНИКОВ А.А., ШАЙДУРОВ Г.Я. Методика выбора опорных сигналов для кодоимпульсной сейсморазведки / Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр./науч. ред. 2013. С. 261.
6. SHAYDUROV G.Y., KUDINOV D.S., KOKHONKOVA E.A., SHCHITNIKOV A.A. Through-the-earth communication in underground mines by electromagnetic waves // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). IEEE, 2016. С. 1–6.
7. SHAYDUROV G.Y., SERGEEVICH K.D., SHCHITNIKOV A.A. Pulsed non-explosive seismic sources with an electromagnetic drive // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Т. 10. №. 15. С. 35907–35913.

REFERENCES

1. KANEVSKY V.F. Coding of harmonic signals in non-explosive seismic exploration using ternary and orthogonal sequences. *Geofizicheskiy zhurnal*. 1996;18;(4):78. (In Russian).
2. MATVEEV D.V., SMIRNOV A.I., LATYPOV K.F. Application of M sequences in communication systems as a method of increasing noise immunity. *Scientific research and development* 2016:733–738. (In Russian).
3. PETRIEVA O.V. Analysis of time-frequency correlation sequences of complex signals. Huffman code sequence (M-sequence). *Aktual'nyye nauchnyye issledovaniya v sovremennom mire*. 2021;8;(3): 76–81. (In Russian).
4. SHAYDUROV G.YA., ROMANOVA G.N., SHCHITNIKOV A.A., KOKHONKOVA E.A., KUDINOV D.S. Wireless communication and signaling systems through rock using electromagnetic and seismic waves. Litres. Litres, 2023. (In Russian).
5. SHCHITNIKOV A.A., SHAYDUROV G.YA. Methodology for selecting reference signals for pulse code seismic exploration. *Modern problems of radio electronics: collection. scientific tr./scient. ed.* 2013:261. (In Russian).
6. SHAYDUROV G.Y., KUDINOV D.S., KOKHONKOVA E.A., SHCHITNIKOV A.A. Through-the-earth communication in underground mines by electromagnetic waves. 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). IEEE, 2016:1–6.

7. SHAYDUROV G.Y., SERGEEVICH K.D., SHCHITNIKOV A.A. Pulsed non-explosive seismic sources with an electromagnetic drive. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015;10;(15):35907–35913.

Кудинов Данил Сергеевич, к.т.н., доцент Сибирского федерального университета

☎ 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79/10, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny Ave., 79/10, e-mail: kudinovdaniil@yandex.ru

Потылицын Вадим Сергеевич, преподаватель Сибирского федерального университета

☎ 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79/10, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny Ave., 79/10, e-mail: markuss86@mail.ru

Алексеев Дмитрий Александрович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Московского физико-технического института, Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН и Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН

☎ 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, 141701, Moscow region, Dolgoprudny, Institutsky lane, 9, e-mail: alexeevgeo@gmail.com, alekseev.da@mipt.ru