

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.3.11>

УДК: 621.391, 621.396

РАДИОЛОКАЦИЯ С ГОЛОГРАФИЧЕСКИМ КОДИРОВАНИЕМ ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА

А.Л. Тимофеев, А.Х. Султанов, И.К. Мешков, А.Р. Гизатулин

Уфимский университет науки и технологий
450076, Уфа, ул. З. Валиди, 32

Статья поступила в редакцию 09 февраля 2024 г.

Аннотация. Разработан способ формирования радиолокационного зондирующего сигнала путем фазокодовой манипуляции сигнала двоичной последовательностью, представляющей собой одномерную цифровую голограмму виртуального оптического объекта. Эффективность данного способа определяется использованием фундаментального свойства голограммы – делимости, позволяющего восстанавливать исходный объект по искаженному фрагменту голограммы. Проведено моделирование радиолокационного обнаружения и измерения параметров целей в условиях шума, приведены результаты сравнения голографического кодирования с широко используемым способом формирования зондирующего сигнала путем фазокодовой манипуляции сигнала псевдослучайной двоичной последовательностью, имеющей максимальный период (последовательность максимальной длины, М-последовательность). Показано, что предлагаемый для использования в цифровой радиолокации голографический способ формирования зондирующего сигнала и декодирования эхо-сигнала обеспечивает высокую помехоустойчивость при высоком уровне шума, естественных и искусственных помех, увеличивает дальность обнаружения цели, обеспечивает разрешение нескольких целей, в том числе малоразмерных целей на фоне крупных, и повышает точность измерения скорости. В результате

проведенного моделирования установлено, что замена фазокодовой манипуляции с М-последовательностью на голографическое кодирование дает выигрыш в отношении сигнал/шум на 20 дБ. Показано, что переход от кодирования формы зондирующего сигнала к голографическому кодированию формы его спектра в канале с аддитивным белым гауссовским шумом позволяет получить дополнительное увеличение помехоустойчивости на 8 дБ.

Ключевые слова: зондирующий сигнал, голографическое кодирование, спектральное кодирование.

Финансирование: Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда, проект № 24-29-0008, <https://rscf.ru/project/24-29-0008/>.

Автор для переписки: Тимофеев Александр Леонидович, a_1_t@inbox.ru

Введение

Повышение помехоустойчивости и помехозащищённости радиолокационного канала является постоянной задачей развития радиолокационных систем [1]. При этом не решенными до конца проблемами являются обнаружение малоразмерных целей на фоне пассивных помех [2] и разрешение распределенных по дальности целей, имеющих близкие радиальные скорости [3]. Кроме того, отдельного внимания требует проблема повышения боковых лепестков автокорреляционной функции (АКФ) при использовании широкополосного зондирующего сигнала (ЗС) [4].

В цифровой радиолокации для формирования ЗС широко применяются фазокодированные сигналы (ФКМ-сигналы), использующие псевдослучайные последовательности. Но АКФ таких сигналов имеют высокий уровень боковых лепестков (УБЛ), что затрудняет выделение полезного сигнала. Для снижения УБЛ используются специальные последовательности, такие как коды Баркера, М-последовательности и коды Голда [5]. В [6] для определения дальности и скорости малоразмерных объектов предлагается

в качестве ЗС использовать ФКМ-сигналы, представляющие собой пачку из когерентных импульсов, кодированных многофазными последовательностями. Однако такие сигналы для обеспечения нулевой зоны автокорреляции требуют точного согласования фильтра с эхо-сигналом. При наличии частотного рассогласования вблизи основного пика АКФ появляются боковые лепестки.

В данной работе предлагается голографический способ формирования ЗС, при котором для фазокодовой манипуляции используется одномерная голограмма виртуального оптического объекта – точечного источника на черном фоне, расположенного в центре линейного массива. Результатом кодирования является простейшая голограмма – зонная пластинка Френеля (для одномерной голограммы – зонная линейка Френеля). В [7, 8] описаны алгоритмы голографического кодирования и декодирования и показано, что голографический код в сравнении с другими помехоустойчивыми кодами имеет более высокую эффективность в обнаружении и распознавании сигнала при очень низком отношении сигнал/шум. Эффективность данного способа определяется использованием фундаментального свойства голограммы – делимости, позволяющего восстанавливать исходный объект по искаженному фрагменту голограммы. Этот факт делает интересным рассмотрение возможности применения голографического способа для формирования ЗС в радиолокации.

1. Моделирование цифровой радиолокации с голографическим кодированием зондирующего сигнала

Оценка эффективности голографического кодирования при обнаружении цели и измерении ее параметров проведена путем моделирования в среде MATLAB.

При формировании зондирующего сигнала точность представления каждого отсчета голограммы практически не влияет на точность позиционирования цели, поэтому значения голограммы округлены до $3x$

уровней (-1, 0, 1). Форма зондирующего сигнала при длине цифровой последовательности голограммы $N = 1024$ показана на рисунке 1.

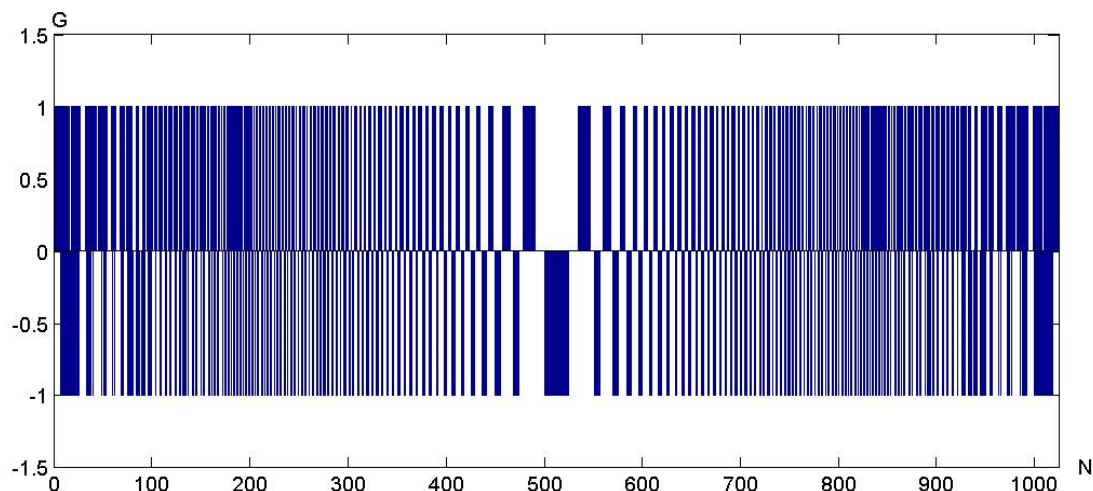


Рис. 1. Форма зондирующего сигнала.

Принятый эхо-сигнал подвергается голографическому декодированию, в результате чего восстанавливается положение центра голограммы, т.е. формируется пик, аналогичный главному пику АКФ, определяющий точную привязку эхо-сигнала к оси времени. Изображение объекта, восстановленного по голограмме, приведено на рисунке 2.

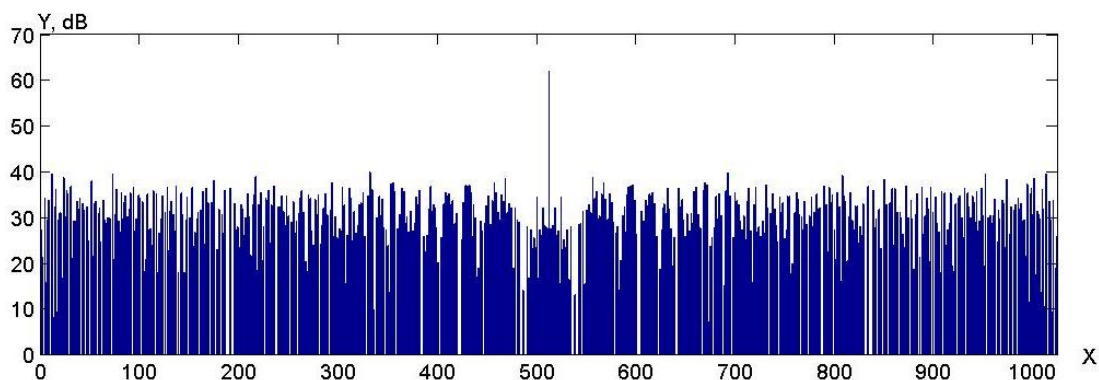


Рис. 2. Восстановленный объект – источник на позиции $X = 512$.

Голографическое кодирование обладает большой помехоустойчивостью. На рисунке 3 показан результат восстановления объекта для $N = 1024$ при отношении сигнал/шум на входе приемника $s/n_{in} = -12$ дБ (сигнал в позиции $X = 1012$). Отношение сигнал/шум на выходе декодера $s/n_{out} = 20$ дБ.

Анализируемый массив сдвинут по оси времени на величину $X = 500$ вследствие задержки эхо-сигнала от удаленной цели.

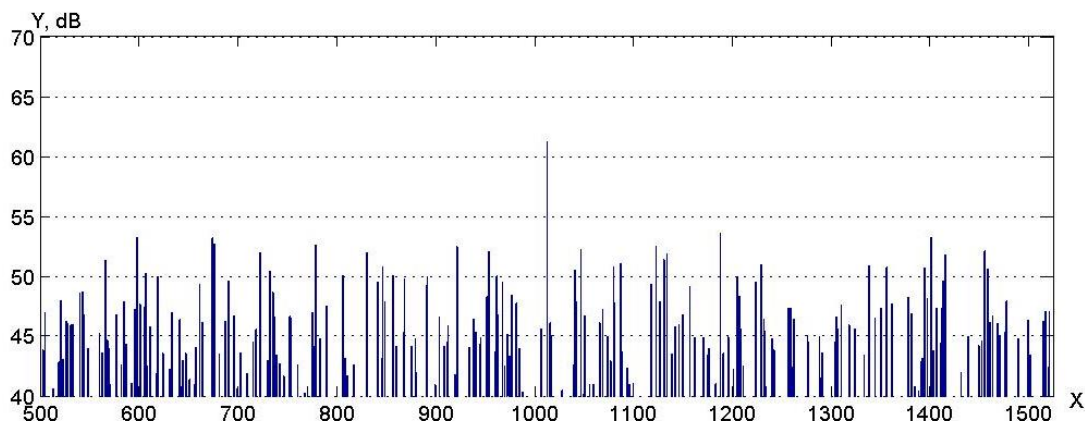


Рис. 3. Восстановление объекта в позиции $X = 500 + 512 = 1012$.

На рисунке 4 показан результат восстановления объекта для $N = 2048$ при отношении сигнал/шум на входе приемника $s/n_{in} = -15$ дБ (сигнал в позиции 1524) и той же дальности цели $X = 500$.

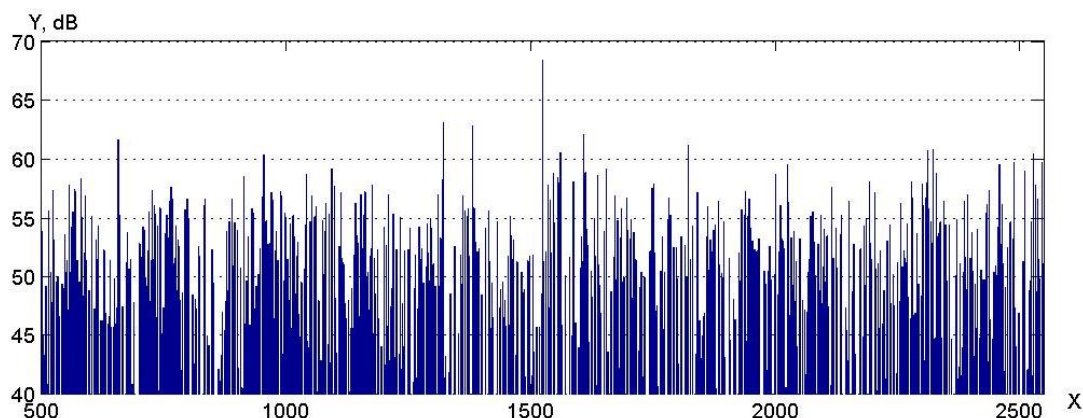


Рис. 4. Восстановление объекта в позиции $X = 500 + 1024 = 1524$ при отношении сигнал/шум на входе приемника $s/n_{in} = -15$ дБ

При моделировании шума в среде MATLAB использована функция `wgn` – генератор белого гауссовского шума.

2. Измерение дальности

Измерение дальности проводится путем восстановления голограммы для каждого положения скользящего окна анализа относительно массива принятого сигнала. При этом во всех окнах максимальный пик находится

в одной и той же позиции, соответствующей дальности цели. Примеры результатов восстановления сигнала для трех положений окна анализа приведены на рисунках 5-7. При полном совпадении окна анализа с эхо-сигналом восстановленный объект имеет наибольшее отношение сигнал/шум (рисунок 6). Длина голограммы (зондирующего сигнала) $N = 1024$, длина окна анализа 1024, принятый массив (0, 2100). Расстояние до цели – 1000, положение принятой голограммы на оси времени – (1000, 2024), отношение сигнал/шум на входе приемника $s/n_{in} = -10$ дБ.

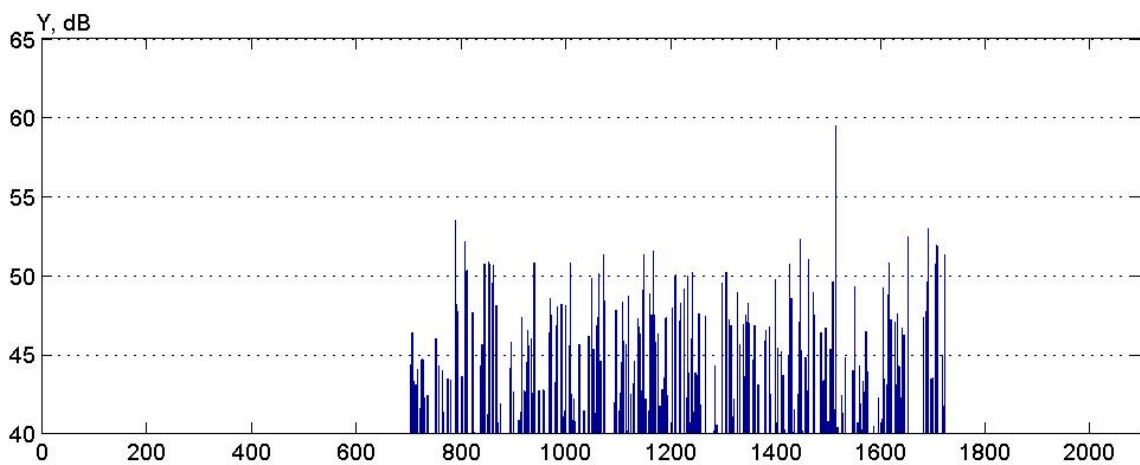


Рис. 5. Положение окна анализа: 700...1724.

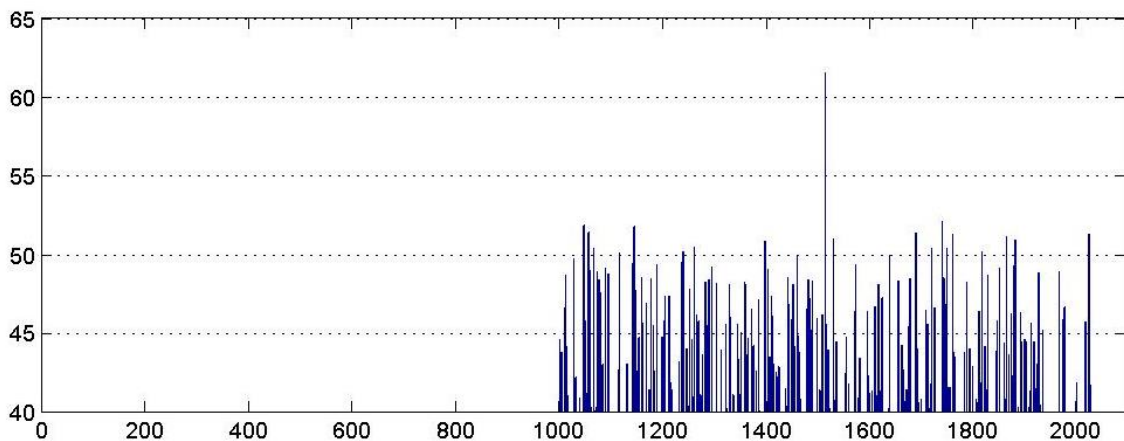


Рис. 6. Положение окна анализа: 1000...2024.

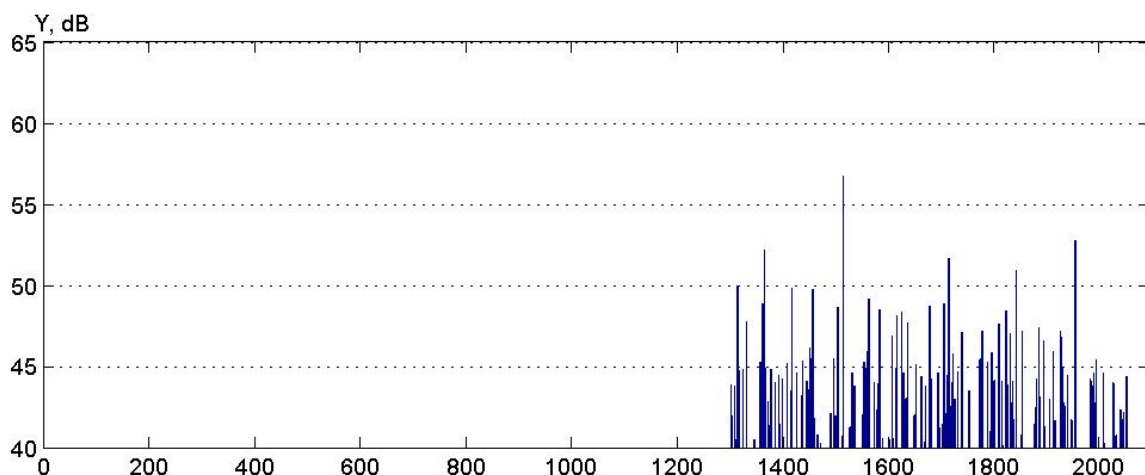


Рис. 7. Положение окна анализа: 1300...2324.

На всех рисунках положение объекта $X = 1512$. Величина X включает в себя дальность цели D и позицию объекта в зондирующем сигнале $A = 512$. Таким образом, измеренное значение дальности составляет $D = X - A = 1000$.

3. Разрешение целей

Отсутствие выраженных боковых лепестков у голограммы восстановленного объекта обеспечивает разрешение близко расположенных целей. Рисунок 8: разрешение двух меток (M1 и M2), различающихся по уровню в 5 раз, малая цель на дальности 1000, большая – 1010, отношение сигнал/шум на входе приемника $s/n_{in} = -10$ дБ:

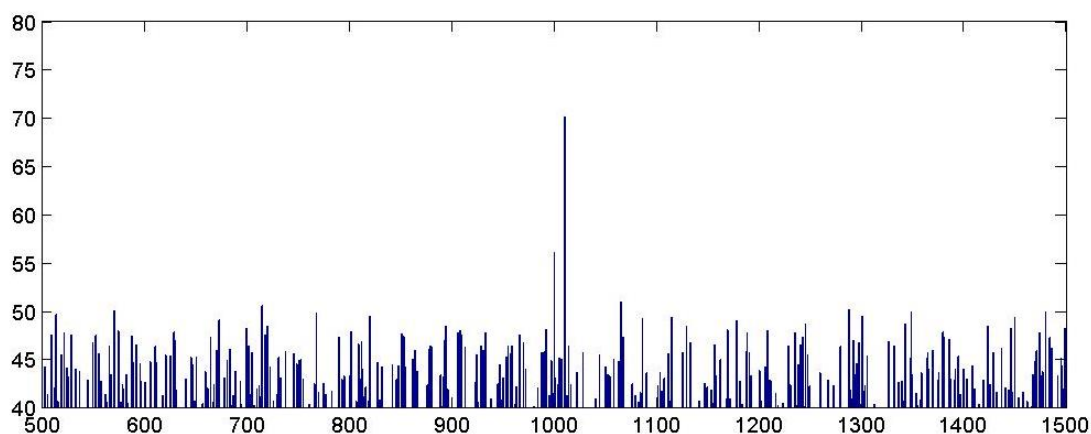


Рис. 8. M1 – 1000, M2 – 1010.

4. Разрешение четырех целей

Зондирующий сигнал имеет длину $N = 1000$. На входе – сумма эхо-сигналов от четырех целей: первая цель на расстоянии 100, три остальных в 5 раз больше, чем первая, их удаление – 300, 500, 700. Результат декодирования (рисунок 9):

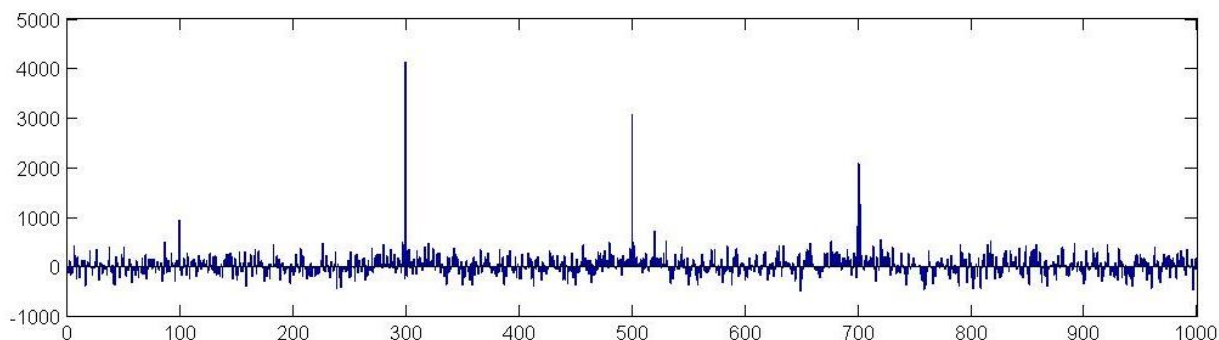


Рис. 9. Обнаружение четырех целей.

5. Измерение скорости цели

Смоделирована балансная амплитудная модуляция эхо-сигнала, обусловленная эффектом Доплера, при отражении от движущейся цели (рисунок 10).

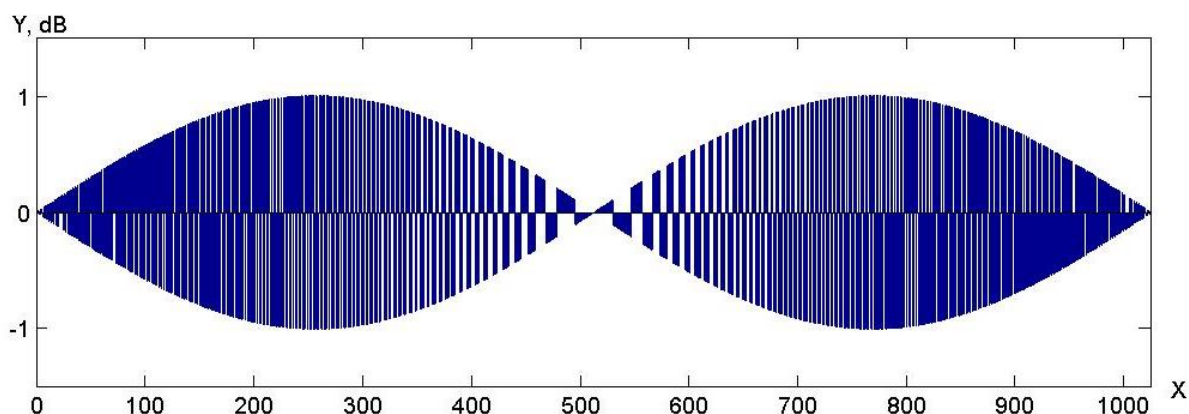


Рис. 10. Эхо-сигнал от движущейся цели.

При балансной модуляции кроме изменения амплитуды, что не существенно при голографическом кодировании, происходит смена знака в каждой второй полуволне модулирующей функции, что делает невозможным использование такого сигнала для декодирования. Поэтому производится

инвертирование второй полуволны путем умножения принятого сигнала на меандр с тем же периодом и амплитудой (1,-1). После этого производится декодирование и восстановление объекта. При $N = 1024$ и отсутствии шума боковые лепестки отсутствуют (рисунок 11, масштаб линейный).

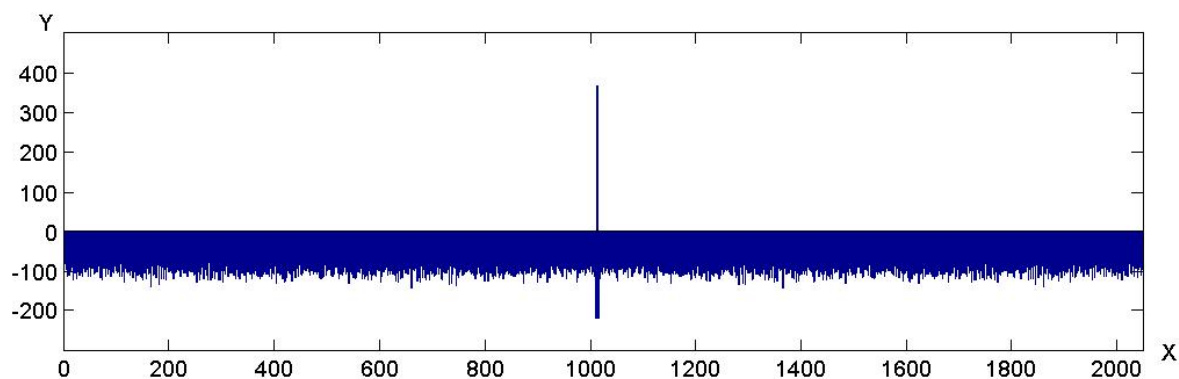


Рис. 11. Восстановленный сигнал при $X = 1012$.

Так как положение эхо-сигнала в принимаемой смеси сигнала с шумом неизвестно, необходимо провести декодирование в скользящем окне анализа с двойным вложенным циклом, в котором переменными параметрами являются фаза и частота модулирующей функции. Из полученного множества результатов декодирования массив с максимальным отношением сигнал/шум выдаст дальность цели и частоту балансной модуляции, по которой определяется скорость цели. Рисунок 12: результат декодирования при отношении сигнал/шум на входе приемника $s/n_{in} = -10$ дБ.

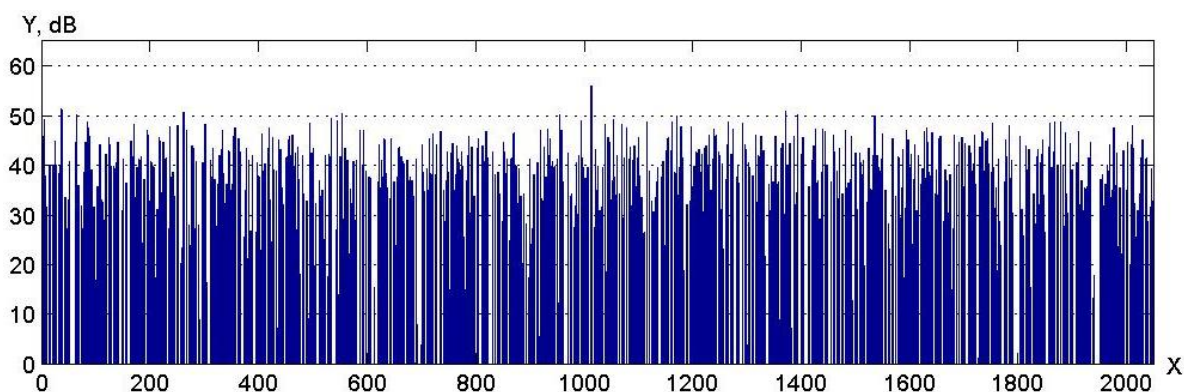


Рис. 12. Восстановленный сигнал при $X = 1012$.

6. Сравнение голографического кодирования с кодированием М-последовательностью

В радиолокации распространенным методом формирования зондирующего сигнала является фазокодовая манипуляция (ФКМ) сигнала псевдослучайной двоичной последовательностью, имеющей максимальный период (последовательность максимальной длины, М-последовательность). Для оценки эффективности голографического кодирования проведено моделирование радиолокационного обнаружения при использовании ФКМ с М-последовательностью. Моделирование, проведенное с М-последовательностью длиной 2047 бит, показало, что предельное значение отношения сигнал/шум, при котором происходит надежное обнаружение эхо-сигнала, – минус 20 дБ. В АКФ превышение основного пика над максимальным шумовым – плюс 3...5 дБ.

При моделировании голографического кодирования длина голограммы выбиралась равной числу бит (длине) М-последовательности. При неизменной форме голограммы принципиальное значение имеет точность расположения оцифрованных бинарных импульсов на оси времени. Для достижения требуемой точности необходима повышенная частота дискретизации голограммы при приеме эхо-сигнала. При этом изменение частоты дискретизации практически не отражается на общей форме голограммы, и она продолжает соответствовать М-последовательности длиной 2047 бит. Оцифровка эхо-сигнала в приемнике с частотой дискретизации, увеличенной в 64 раза, дает дополнительное преимущество: можно использовать скользящее усреднение входной смеси сигнала. В этом случае восстановление сигнала с превышением над максимальным выбросом на 2-3 дБ происходит при отношении сигнал/шум на входе приемника минус 40 дБ. Достижимый выигрыш в отношении сигнал/шум составляет 20 дБ.

7. Спектральное кодирование

Еще более высокую помехоустойчивость радиолокации можно получить, переведя обработку информации из области времени в частотную область, и используя спектральное кодирование [9, 10]. При спектральном голографическом кодировании зондирующий сигнал формируется в аналоговом виде, при этом форма спектра сигнала совпадает с цифровой одномерной голограммой, представляющей собой последовательность нулей и единиц – единица в i -й позиции означает наличие в спектре i -й гармоники, ноль – отсутствие. ЗС $y(mT)$ с таким линейчатым спектром может быть получен путем сложения гармоник равной амплитуды с номерами, соответствующими номерам позиций единиц в голограмме:

$$y(mT) = \sum_{i=1}^N (G(i) \cdot \sin(2\pi(m/M) \cdot i + r(i) \cdot 2\pi)),$$

где $G(i)$ – линейная цифровая голограмма, N – размер голограммы, M – число отсчетов в сигнале, $r(i)$ – случайное число в диапазоне $0 \dots 1$. Гармоники с номерами, соответствующими позициям нулей в голограмме, при формировании сигнала $y(mT)$ не используются. Такой способ формирования сигнала можно отнести к мультиплексированию с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM), отличающийся тем, что частоты N ортогональных поднесущих находятся в кратном отношении, а в качестве цифровой модуляции используется амплитудная манипуляция.

Операция формирования сигнала $y(mT)$ может быть реализована в аналоговой форме, если удастся обеспечить кратность всех частот первой гармонике. Однако цифровой способ во многих случаях позволит сделать это точнее и проще, и реализован он может быть в двух вариантах: 1) алгебраическое сложение нужных гармоник с последующим цифро-аналоговым преобразованием, 2) обратное быстрое преобразование Фурье голограммы. Обязательное требование к минимальной длительности сигнала $y(mT)$ – она должна быть равна одному периоду первой гармоники.

Длительность сигнала может быть и больше, и это не повлияет на помехоустойчивость кодирования, но при этом пропорционально увеличится время обработки.

Весьма существенной характеристикой является пик-фактор сигнала $y(mT)$. Величина пик-фактора зависит от распределения фаз суммируемых гармоник и достигает максимума в синфазном варианте (рисунок 13).

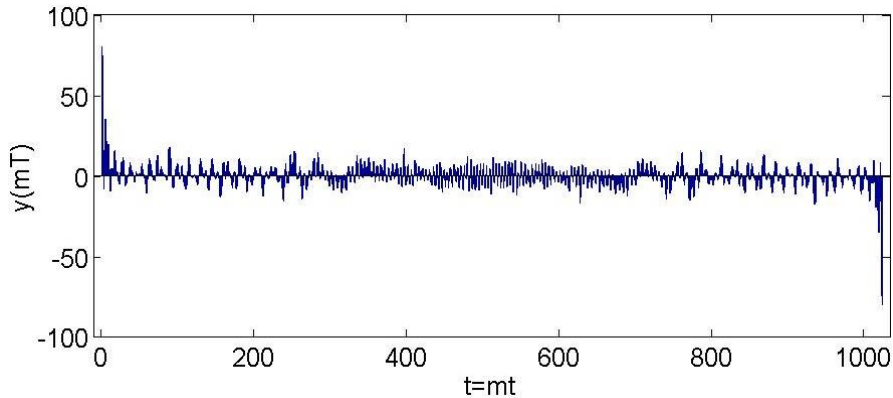


Рис. 13. Форма ЗС при синфазном сложении гармоник.

Высокое значение пик-фактора требует большей линейности усилителя, а при невыполнении этого условия приводит к увеличению внеполосных излучений и снижению помехоустойчивости. Моделирование показало, что минимальное значение пик-фактора достигается при случайном распределении фаз гармоник. ЗС $y(mT)$ в этом случае имеет шумоподобную форму (рисунок 14).

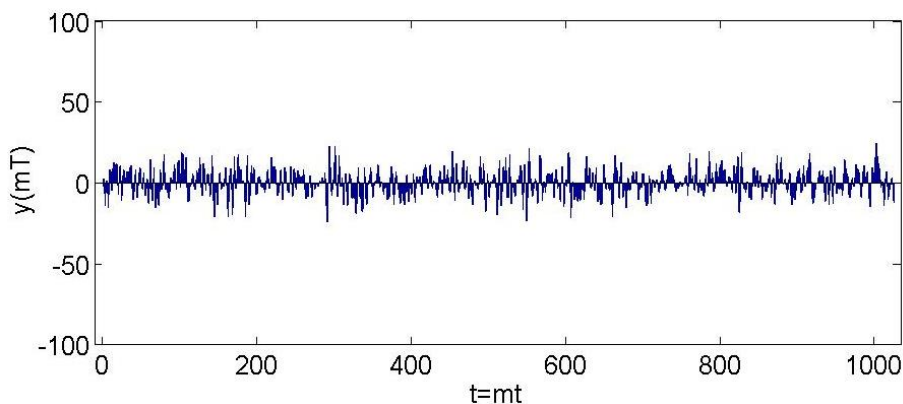


Рис. 14. Форма ЗС при случайном распределении фаз.

Для обнаружения эхо-сигнала в приемнике сигнал оцифровывается и вычисляется его спектр. Выделение для построения спектра фрагмента эхо-сигнала, содержащего целое число периодов каждой гармоники (один период первой гармоники, два – второй и так далее до N периодов гармоники с номером $N(f_N)$), позволяет получить линейчатый спектр.

Моделирование спектрального голографического кодирования в канале с аддитивным белым гауссовским шумом показало, что перенос операций голографического кодирования из временной области в частотную позволяет получить дополнительное увеличение помехоустойчивости на 8 дБ.

Заключение

Предлагаемый для использования в цифровой радиолокации голографический способ формирования зондирующего сигнала и декодирования эхо-сигнала обеспечивает высокую помехоустойчивость при высоком уровне шума, естественных и искусственных помех, увеличивает дальность обнаружения цели, обеспечивает разрешение нескольких целей, в том числе малоразмерных целей на фоне крупных, и повышает точность измерения скорости. Замена ФКМ с М-последовательностью на голографическое кодирование дает выигрыш в отношении сигнал/шум на 20 дБ. Переход к кодированию спектра повышает помехоустойчивость на 8 дБ.

Финансирование: Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда, проект № 24-29-0008, <https://rscf.ru/project/24-29-00080/>.

Литература

1. Борзов А.Б., Лихоеденко К.П., Муратов И.В., Павлов Г.Л., Сучков В.Б. Пути развития систем ближней радиолокации миллиметрового диапазона волн // Радиолокация и радиосвязь: Труды III Всероссийской конференции. ИРЭ РАН, 26-30 октября. – 2009. <http://jre.cplire.ru/jre/oct09/3/text.pdf>.

2. Детков А.Н., Никоненко А.В., Ницак Д.А. Обнаружение флуктуирующих малоразмерных целей на фоне флуктуирующей пассивной помехи под наблюдением поляриметрической РСА // Журнал радиоэлектроники. – 2014. – №. 10. <http://jre.cplire.ru/jre/oct14/5/text.pdf>.
3. Ипанов Р.Н. Когерентные дополнительные сигналы и их применение в радиолокации // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – №. 2. <http://jre.cplire.ru/jre/feb15/8/text.pdf>.
4. Скосырев В.Н. Повышение информативности радиолокационных систем на основе технологий сверхширокополосных сигналов // Журнал радиоэлектроники. – 2012. – №. 7. <http://jre.cplire.ru/jre/jul12/9/text.pdf>.
5. Лялин К.С., Хасанов М.С., Мелёшин Ю.М., Кузьмин И.А. Спектральный метод подавления боковых лепестков автокорреляционной функции длинных псевдослучайных бинарных последовательностей // Труды МАИ. – 2018. – №. 103. <http://trudymai.ru/published.php?ID=100800>.
6. Баскаков А.И., Ипанов Р.Н., Комаров А.А. Фазокодированные радиолокационные сигналы для точного определения дальности и скорости малоразмерных космических объектов // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.12.7>.
7. Тимофеев А.Л., Султанов А.Х. Построение помехоустойчивого кода на базе голографического представления произвольной цифровой информации // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44. – №. 6. – С. 978-984. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-739>.
8. Timofeev A.L., Sultanov A.K. Holographic method of error-correcting coding // Optical Technologies for Telecommunications 2018. – SPIE, 2019. – Т. 11146. – С. 365-370. <https://doi.org/10.1117/12.2526922>.
9. Тимофеев А.Л., Султанов А.Х., Мешков И.К., Гизатулин А.Р. Использование спектрального подхода при обработке изображений и произвольных данных // Информационно-управляющие системы. – 2022. – №. 4 (119). – С. 2-11. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2022-4-2-11>.

10. Timofeev A.L., Sultanov A.Kh., Meshkov I.K., Gizatulin A.R. Spectral image compression // Optical Technologies for Telecommunications 2021. – SPIE, 2022. – Т. 12295. – С. 226-232. <https://doi.org/10.1117/12.2632146>.

Для цитирования:

Тимофеев А.Л., Султанов А.Х., Мешков И.К., Гизатулин А.Р. Радиолокация с голографическим кодированием зондирующего сигнала. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.3.11>