

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.4.15>

УДК: 621.391

РАСШИРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

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 10 марта 2026 г.

Аннотация. Цифровая обработка спектра позволяет в ряде случаев отказаться от аналоговых трактов обработки в радиоканале при приеме модулированных сигналов и проводить извлечение информации цифровым способом. Перенос цифровой обработки из временной области в частотную дает возможность упростить как алгоритмическую, так и аппаратную часть цифрового демодулятора. Показано, что для демодуляции оцифрованного в приемнике амплитудно-модулированного сигнала достаточно в его спектре сдвинуть в область низких частот спектр верхней боковой полосы, обнулив спектры несущей и нижней боковой полосы. Обратное преобразование Фурье полученного спектра даст демодулированный сигнал. Предлагаемый спектральный метод цифровой демодуляции позволяет отказаться от использования аналоговой аппаратуры обработки сигнала в высокочастотном тракте за счет замены всех операций на цифровую спектральную обработку. При использовании этого метода отпадает необходимость в самой модуляции – для переноса цифрового низкочастотного сигнала в область высоких частот достаточно сдвинуть его спектр по оси частот в нужную позицию. Спектральный подход позволяет также повысить помехоустойчивость без использования специального

помехоустойчивого кодирования за счет введения адаптивной избыточности, уровень которой регулируется в соответствии с уровнем шума в канале. При этом избыточность может вводиться и по времени, и по ширине спектра. Например, при использовании для передачи информации 80 % выделенной полосы частот и 70 % доступной длительности интервала времени спектральный способ позволяет задействовать незанятые 20 % частотного диапазона плюс 30 % временного интервала и ввести избыточность в размере 50 %, снижающую вызванные шумом искажения в 1,3 раза.

Ключевые слова: спектральная обработка, цифровая модуляция, цифровая демодуляция, регулируемая избыточность.

Финансирование: Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда, проект № 25-29-01149, <https://rscf.ru/project/25-29-01149/>.

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

Введение

В цифровых системах связи широко используются методы цифровой спектральной обработки сигналов. В работе [1] рассмотрено использование спектральной обработки для подавления узкополосной помехи, в [2] предложен способ повышения эффективности спектральной режекции узкополосных помех в широкополосных сигналах, в [3,4] спектральный подход использован для сжатия изображений, передаваемых по каналу связи. В работе [5] рассмотрен спектральный подход к помехоустойчивому кодированию и сделан вывод, что переход к кодированию спектра сигнала обеспечивает выигрыш в помехоустойчивости на 7-8 дБ по сравнению с кодированием непосредственно сигнала. Спектральный подход к снижению уровня боковых лепестков автокорреляционных функций длинных псевдослучайных последовательностей может быть применен для улучшения качества радиолокационных и других систем связи [6]. Перенос процедуры кодирования зондирующего радиолокационного импульса в спектральную область позволяет получить дополнительное повышение помехоустойчивости [7]. В работе [8] проведено исследование

передачи и приема дискретных сообщений на основе спектральной модуляции шумовых сигналов в сверхширокополосном канале связи с аддитивным гауссовским белым шумом, результаты свидетельствуют о высокой скрытности и электромагнитной совместимости системы связи при передаче дискретной информации в канале связи с помехой. Методы спектральной обработки сигналов применительно к РЛС рассмотрены в [9] и сделан вывод, что по информативности РЛС со спектральной обработкой сигналов не уступают РЛС с корреляционной обработкой сигнала, но отличаются простотой реализации.

Большая часть указанных методов ориентирована на цифровую спектральную обработку сигнала, прошедшего операции аналогового преобразования в высокочастотном тракте. Однако, с появлением быстродействующих АЦП гигагерцового диапазона, например, AD9213 с максимальной частотой дискретизации 10 ГГц, предназначенного для использования в тракте высокой частоты в системах связи 5G [10], появляется возможность расширить область применения цифровых методов. Рассмотрим открывающиеся, в связи с этим, возможности спектральных методов цифровой обработки сигналов.

1. Цифровая демодуляция АМ сигнала

Цифровая обработка спектра позволяет в ряде случаев отказаться от аналоговых трактов обработки в радиоканале при приеме модулированных сигналов и проводить извлечение информации цифровым способом. При этом возможно использование, как классических алгоритмов демодуляции, так и прямых спектральных методов. В работе [11], например, рассмотрен когерентный цифровой демодулятор сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией, производящий обработку сигнала во временной области. Для реализации этого метода необходимо достаточно сложное аппаратное решение, что снижает эффективность перехода от аналоговой к цифровой обработке сигнала. В то же время перенос цифровой обработки из временной области в частотную дает возможность упростить как алгоритмическую,

так и аппаратную часть цифрового демодулятора. Рассмотрим это на примере амплитудной модуляции (АМ). Для демодуляции оцифрованного в приемнике АМ сигнала достаточно в его спектре сдвинуть в область низких частот спектр верхней боковой полосы, обнулив спектры несущей и нижней боковой полосы. Обратное преобразование Фурье (ОПФ) полученного спектра даст демодулированный сигнал. При использовании этого метода отпадает и необходимость аналоговой модуляции в передатчике – ее можно выполнить в цифровой форме, провести цифроаналоговое преобразование быстродействующим ЦАП и подать сигнал в выходной усилитель передатчика. Более того, отпадает необходимость в самой модуляции – для переноса цифрового низкочастотного сигнала в область высоких частот достаточно сдвинуть его спектр по оси частот в нужную позицию. Для практического использования этого метода необходимо учесть изменение фазового спектра в результате переноса по частоте и компенсацию этого изменения цифровой фазовой коррекцией.

Моделирование цифровой демодуляции АМ сигнала проведено в среде MATLAB. В качестве низкочастотного сигнала использована функция $y(t)$, содержащая две гармоники:

$$y(t) = 0.2 \times \sin(2\pi \times 3/T) + 0.2 \times \sin(2\pi \times 7/T),$$

где T – длительность сигнала.

Форма сигнала приведена на рис. 1, его амплитудный спектр – на рис. 2.

При вычислении дискретного преобразования Фурье (ДПФ) число значений сигнала (в данном примере 256) принимается равным значению частоты дискретизации $f_d = 256$. В диапазоне частот $f(1,256)$ расположены основная копия спектра, занимающая нижнюю половину этого диапазона с максимальной частота спектра $f_m = 128$, и инверсная копия спектра в верхней половине диапазона. Все операции со спектром необходимо проводить зеркально с основной и инверсной копиями спектра и учитывать, что спектр

описывается комплексной функцией и все преобразования должны производиться над комплексными величинами.

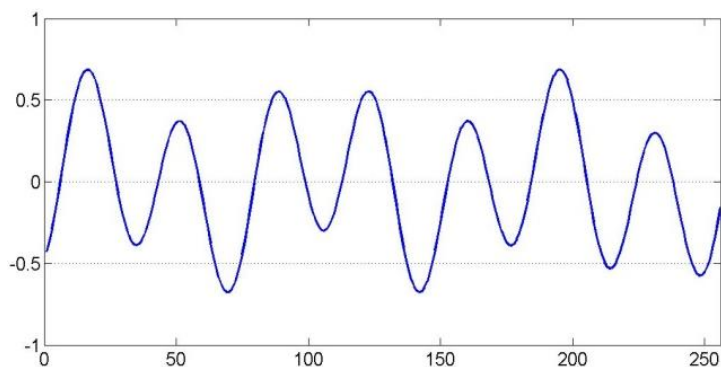


Рис. 1. Сигнал.

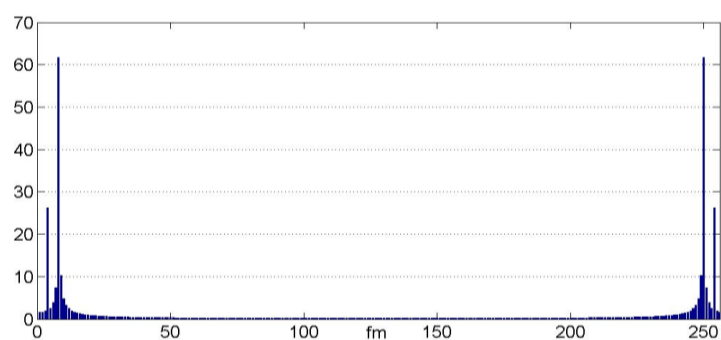


Рис. 2. Прямая и инверсная копии спектра.

В результате амплитудной модуляции получен высокочастотный сигнал (рис. 3), спектр которого приведен на рисунке 4.

Так как спектр АМ сигнала содержит боковые полосы, спектр которых имеет форму спектра модулирующего сигнала (верхняя боковая полоса является его прямой копией, нижняя – инверсной), операцию демодуляции можно провести в спектральной области.

На рисунке 5 показаны действия, которые необходимо произвести со спектром для демодуляции:

- удаление инверсной копии в полном объеме;
- удаление несущей частоты в основной копии;
- перенос верхней боковой полосы в диапазон частот основной копии спектра модулирующего сигнала;
- перенос нижней боковой полосы в диапазон частот инверсной копии спектра модулирующего сигнала.

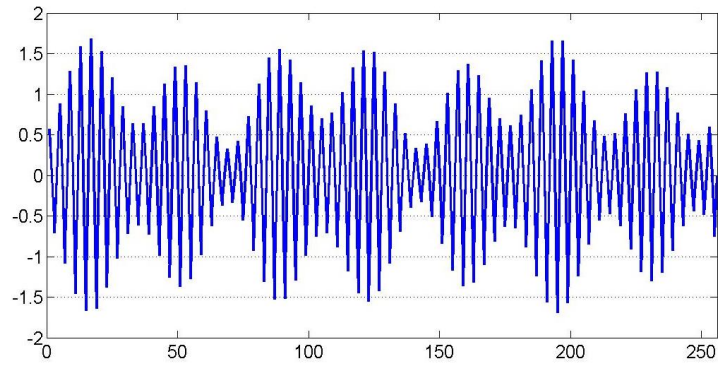


Рис. 3. Модулированный сигнал.

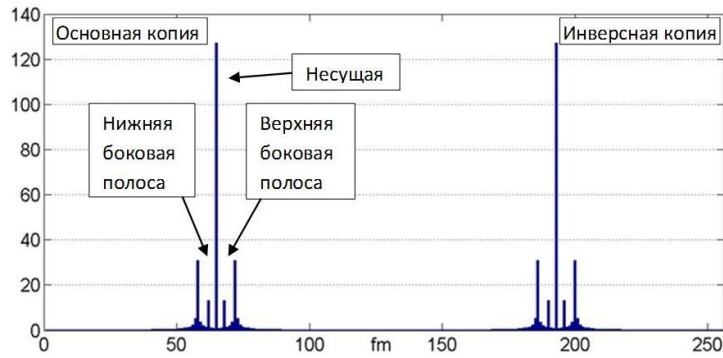


Рис. 4. Основная и инверсная копии спектра модулированного сигнала.

В результате будет получен спектр, форма которого совпадает с формой спектра рис. 2.

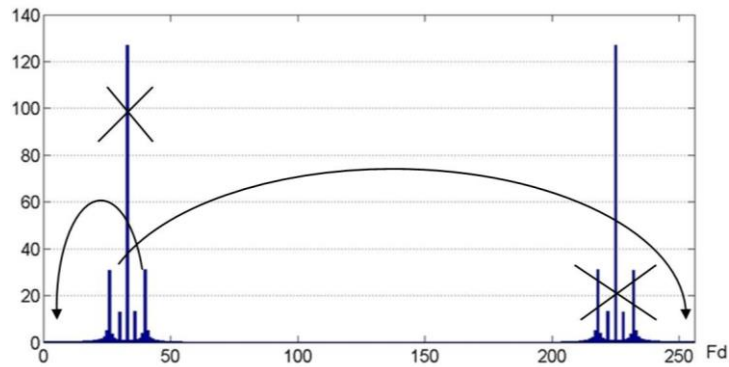


Рис. 5. Действия по демодуляции.

Обратное преобразование Фурье полученного спектра дает демодулированный сигнал (рис. 6).

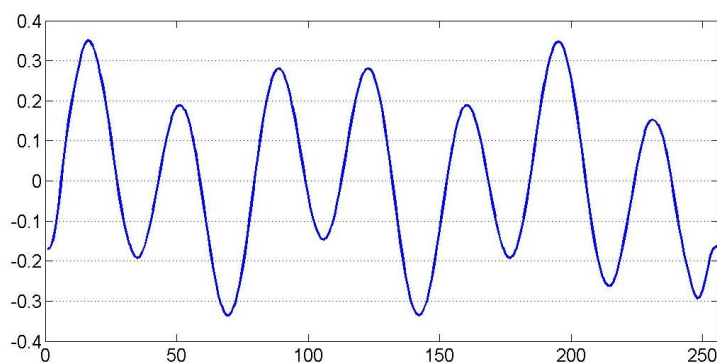


Рис. 6. Демодулированный сигнал.

Как видно из сравнения рисунков 1 и 6 демодулированный сигнал очень близко воспроизводит модулирующий сигнал.

Энергоэффективность АМ демодуляции может быть повышена, если использовать обе боковые полосы спектра. Известен способ демодуляции с суммированием боковых полос с учетом их «зеркальности» [12]. Реализация этого способа требует больших аппаратных затрат – необходим массив узкополосных цифровых фильтров. В то же время рассматриваемый спектральный подход позволяет без аппаратных затрат удвоить энергоэффективность амплитудной демодуляции за счет использования обеих боковых полос путем суммирования (с учетом инверсии) двух боковых полос и переноса результата в диапазон низких частот в основной и в инверсной копиях спектра. Полученный после ОПФ такого спектра демодулированный сигнал имеет форму рис. 6, но амплитуду в 2 раза больше.

2. Цифровая модуляция/демодуляция с одной боковой полосой

Появление аппаратных средств, предназначенных для обработки сигналов в тракте высокой частоты, позволяет рассмотреть возможность реализации в цифровой форме не только демодуляции АМ сигналов, но и полные циклы других видов модуляции/демодуляции. В этой связи представляет интерес амплитудная модуляция с одной боковой полосой, сигнал которой занимает полосу частот вдвое уже, чем АМ-сигнал, что позволяет более эффективно использовать частотный ресурс. При реализации однополосной модуляции традиционным аналоговым способом ее широкому распространению

препятствуют требования к точности и стабильности частоты и относительная сложность аппаратуры – для модуляции и детектирования необходимы высокочастотные полосовые фильтры, балансные модуляторы и когерентные демодуляторы. При использовании цифровой обработки сигналов в тракте высокой частоты результат достигается более простыми операциями над спектрами сигналов. Рассмотрим цифровую спектральную реализацию однополосной модуляции. Модулирующий сигнал, образованный суммой 9 гармоник, приведен на рисунке 7, а его спектр – на рисунке 8.

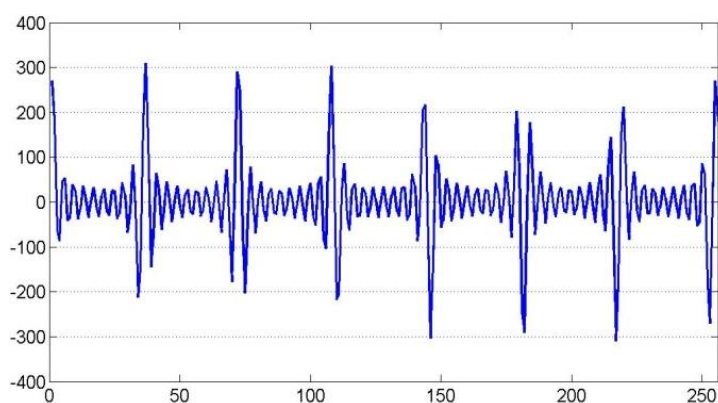


Рис. 7. Модулирующий сигнал.

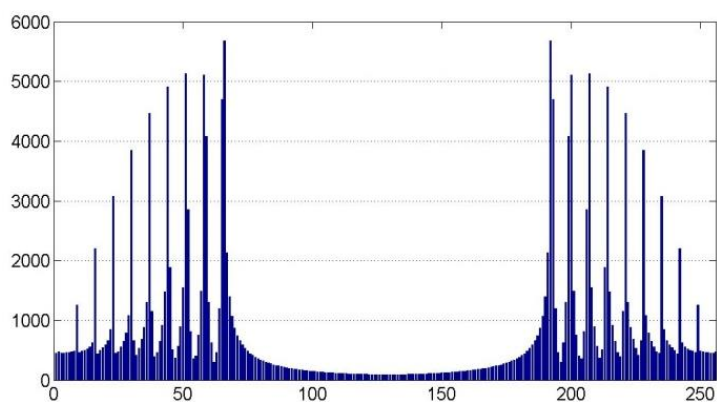


Рис. 8. Спектр модулирующего сигнала (прямая и инверсная копии).

Для получения модулированного сигнала достаточно перенести спектр в нужный частотный диапазон (рис. 9).

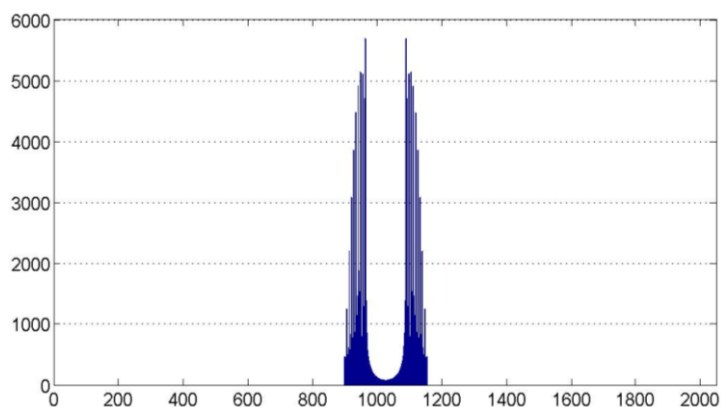


Рис. 9. Спектр модулированного сигнала (прямая и инверсная копии).

Обратное преобразование Фурье формирует сигнал для передачи по радиоканалу (рис. 10).

В приемнике сигнал оцифровывается, вычисляется его спектр, производится сдвиг спектра в низкочастотную область и обратным преобразованием Фурье формируется сигнал, совпадающий с исходным модулирующим сигналом (рис. 7).

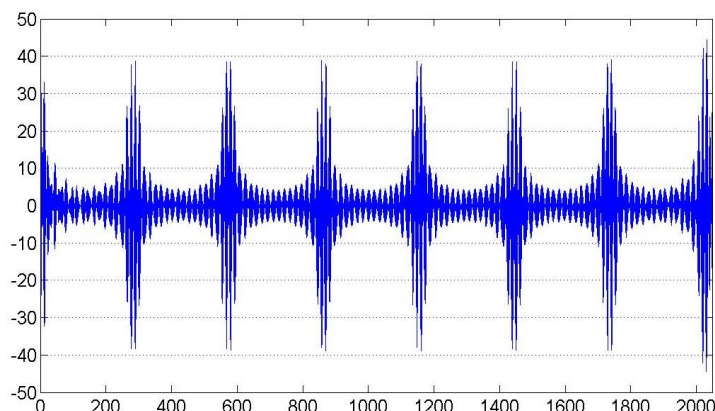


Рис. 10. Модулированный сигнал.

3. Спектральный метод введения регулируемой избыточности для повышения помехоустойчивости

Обязательным условием всех способов повышения помехоустойчивости при передаче информации по зашумленным каналам связи является введение информационной избыточности. Вид избыточности и ее размер определяются используемым способом помехоустойчивого кодирования. Выбор способа кодирования происходит с учетом параметров сигнала и характеристик

канала связи: для цифрового канала – интенсивности ошибок, для аналогового канала – уровня шума и помех. Большое значение имеет степень сложности кодирования/декодирования и, соответственно, требуемая вычислительная мощность. Практически во всех корректирующих кодах, обеспечивающих автоматическое исправление ошибок, степень вводимой избыточности определяется способом кодирования и жестко связана с размером кодируемого информационного блока. Усреднение в пределах введенной избыточности с мажоритарным способом выбора решения является одним из наиболее надежных способов передачи информации в сильно зашумленных каналах [13]. Для увеличения степени свободы при введении избыточности представляет интерес возможность использования избыточности, размер которой регулируется в соответствии с уровнем шума в канале связи. Такую возможность дает перевод цифровой обработки из временной в частотную область путем введения избыточности не в сигнал, а в спектр сигнала. Для этого при цифровой обработке сигналов используется операция интерполяции (передискретизации) – повышение частоты дискретизации. В результате к высокочастотной части цифрового спектра добавляется нулевой фрагмент требуемого размера. Обратное преобразование Фурье формирует сигнал, содержащий большее количество отсчетов, то есть, имеющий ту же форму, но более высокую частоту дискретизации. При передаче этого сигнала по каналу связи происходит наложение аддитивного случайного шума. В приемнике в процессе устранения введенной избыточности уменьшается влияние шума и снижается уровень искажений. Моделирование этого способа передачи проведено в среде MATLAB.

Рассмотрим процесс передачи по каналу связи цифрового сигнала $s(t)$, содержащего 8 гармоник:

$$s(t) = \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^T (1+i \times 0.8) \times \sin(2 \times \pi \times i \times j / (T-8)).$$

Форма сигнала показана на рисунке 11.

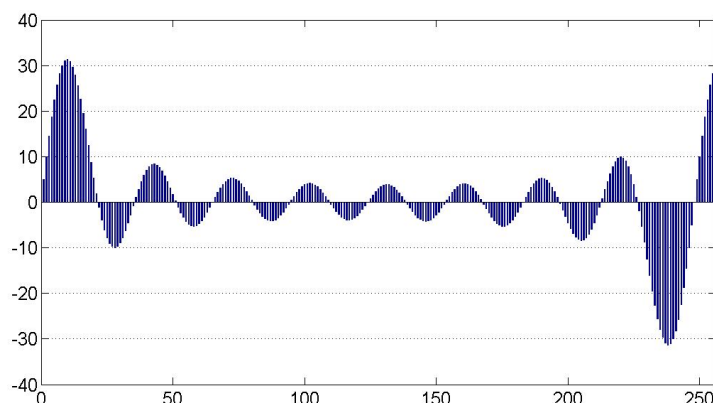


Рис. 11. Передаваемый сигнал.

На рисунке 12 приведен амплитудный спектр этого сигнала (прямая и инверсная копии).

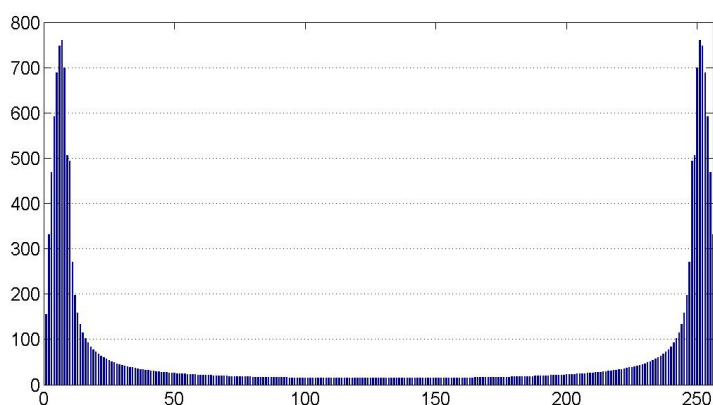


Рис. 12. Амплитудный спектр сигнала.

При вычислении спектра число его значений равно числу значений сигнала, при этом спектр, включающий прямую и инверсную копии, формируется в диапазоне частот от 0 до частоты дискретизации f_d , в данном случае значение частоты дискретизации $f_d = 256$. Основная копия спектра занимает нижнюю половину этого диапазона и максимальная частота спектра $f_m = 128$. Верхняя половина – это инверсная копия спектра.

Введем избыточность в размере 50 % путем добавления 64 нулевых значений в высокочастотную часть основной копии спектра и, соответственно, 64 – в инверсную (рис. 13). За счет этого число отсчетов спектра и сигнала увеличивается до 384.

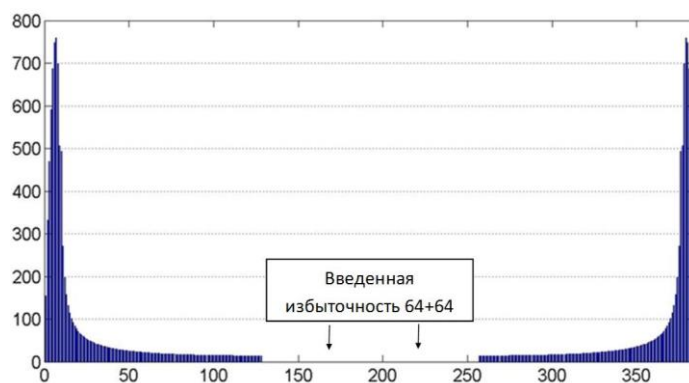


Рис. 13. Спектр после введения избыточности.

Обратное преобразование Фурье дает сигнал, содержащий избыточность 50 % – большее число отсчетов при той же форме (рис. 14).

При введении нулевых отсчетов в спектр форма сигнала во временной области не изменяется, но добавляется соответствующее число отсчетов, т.е. увеличивается частота дискретизации до $f_d = 384$.

Сигнал, приведенный на рис. 11, передается по каналу связи с шумом (отношение сигнал/шум $S/N = 20$ дБ) и в приемнике фиксируется сигнал, приведенный на рис. 15. Спектр сигнала с шумом приведен на рис. 16.

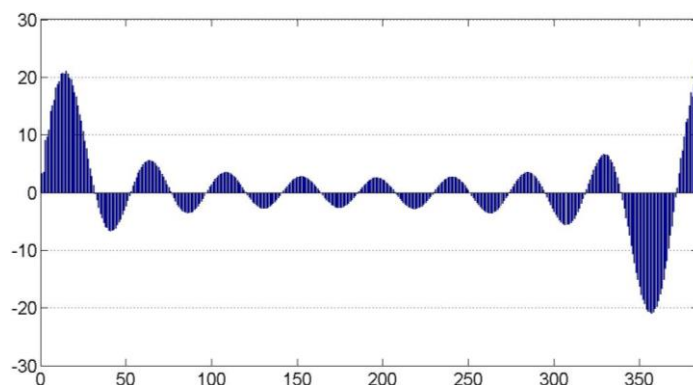


Рис. 14. Сигнал после введения избыточности.

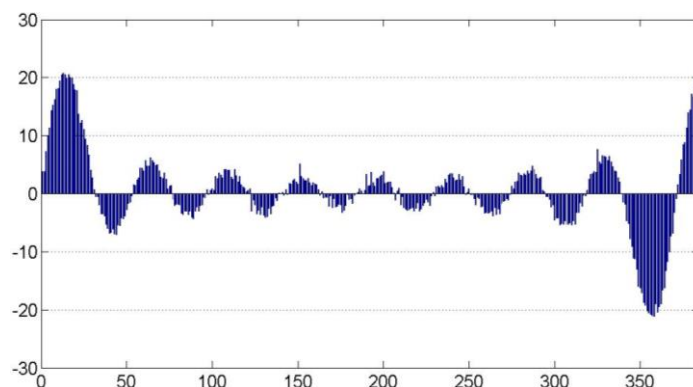


Рис. 15. Принятый сигнал с шумом.

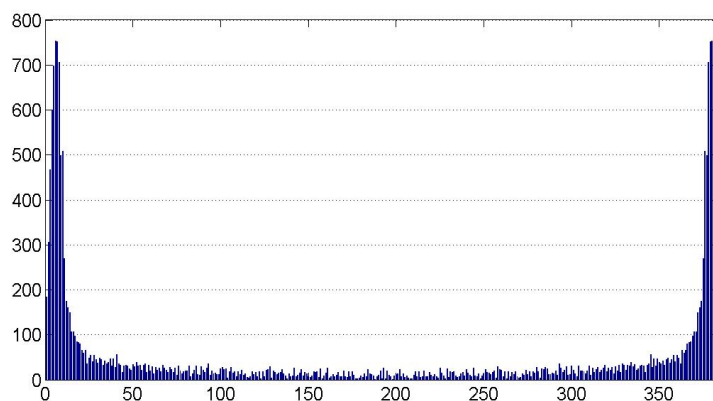


Рис. 16. Спектр сигнала с шумом.

Так как высокочастотная (добавленная) часть спектра не содержит информации, она при обработке в приемнике обнуляется и производится сдвиг инверсной копии спектра в первоначальное положение (сужение спектра) – рисунок 17.

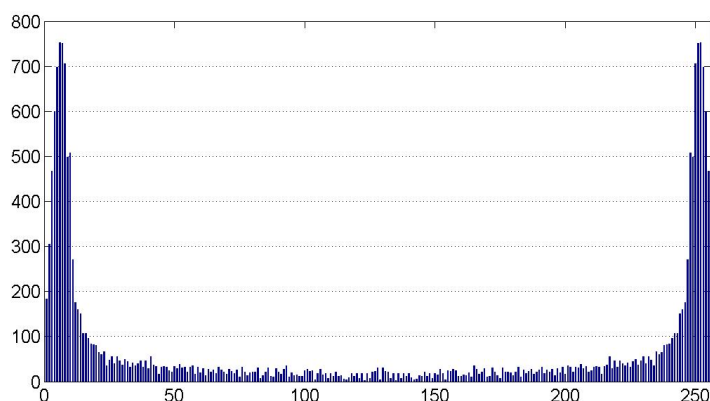


Рис. 17. Спектр после устранения избыточности.

Проведением обратного преобразования Фурье формируется восстановленный сигнал (рис. 18).

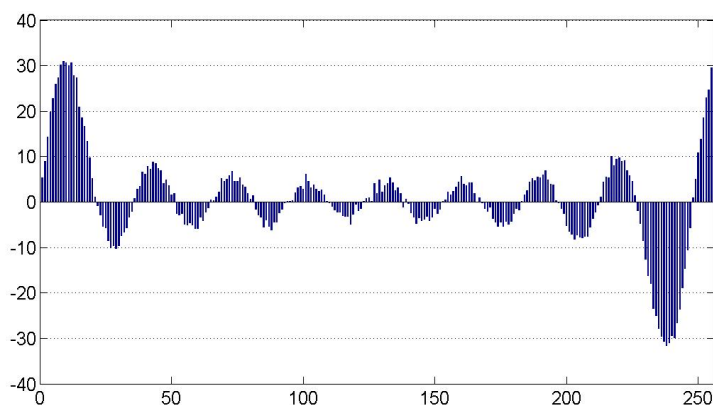


Рис. 18. Восстановленный сигнал.

Из сравнения рисунков 14, 15 и 18 видно, что восстановленный сигнал на рис. 18 содержит несколько меньшие искажения, чем сигнал на входе приемника (рис. 15). Для количественной оценки уменьшения искажений использована среднеквадратическая ошибка (СКО) – отклонение сигнала с шумом $n(i)$ на входе приемника от излучаемого сигнала $s(i)$:

$$CKO = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s(i) - n(i))^2}.$$

Для сигнала на рисунке 14, переданного по каналу связи с избыточностью 50 % при отношении сигнал/шум $S/N = 20$ дБ, СКО, вызванная воздействием шума, уменьшилась в 1,3 раза по сравнению с сигналом, переданным без избыточности.

Особенностью спектрального способа введения избыточности является то, что избыточность может вводиться как по времени (увеличение длительности сигнала), так и по частоте (расширение спектра). Так же эти виды избыточности могут вводиться совместно. Вид избыточности определяется частотой дискретизации: если при цифро-аналоговом преобразовании сигнала с избыточностью в передатчике используется та же частота дискретизации, что и при аналого-цифровом преобразовании исходного сигнала, то происходит увеличение длительности сигнала. Если используется более высокая частота дискретизации, происходит расширение спектра – сигнал имеет ту же длительность, но занимает более широкий диапазон частот.

В тех случаях, когда требуется более высокая точность передачи сигнала и/или отношение сигнал/шум имеет меньшую величину, необходимо увеличивать вводимую избыточность. Например, при мощности шума, равной мощности сигнала ($S/N = 0$ дБ), сигнал на входе приемника изображен на рис. 19, а сигнал, восстановленный при 8-кратной избыточности, – на рис. 20.

В этом случае среднеквадратическая ошибка восстановления сигнала уменьшена в 3 раза.

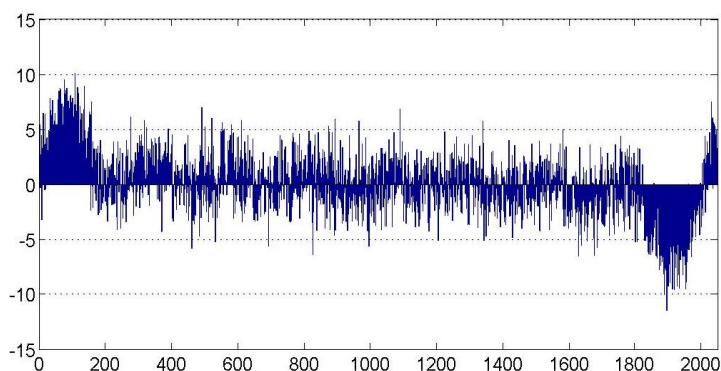
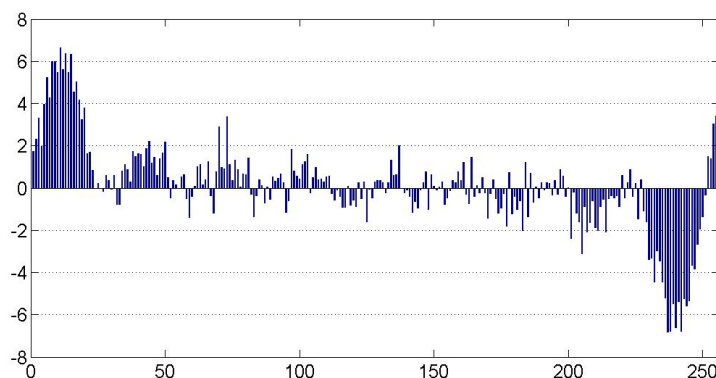


Рис. 19. Сигнал с шумом при отношении сигнал/шум 0 дБ.

Рис. 20. Восстановленный сигнал при $S/N = 0$ дБ.

Заключение

Описанный спектральный метод цифровой демодуляции позволяет отказаться от использования аналоговой аппаратуры обработки сигнала в высокочастотном тракте за счет замены всех операций на цифровую спектральную обработку. При использовании этого метода отпадает необходимость в самой модуляции – для переноса цифрового низкочастотного сигнала в область высоких частот достаточно сдвинуть его спектр по оси частот в нужную позицию. Спектральный подход позволяет также повысить помехоустойчивость без использования специального помехоустойчивого кодирования за счет введения адаптивной избыточности, уровень которой регулируется в соответствии с уровнем шума в канале. При этом избыточность может вводиться и по времени, и по ширине спектра. Например, при использовании для передачи информации 80 % выделенной полосы частот и 70 % доступной длительности интервала времени спектральный способ позволяет задействовать незанятые 20 % частотного диапазона плюс 30 %

временного интервала и ввести избыточность в размере 50%, снижающую вызванные шумом искажения в 1,3 раза.

Финансирование: Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда, проект № 25-29-01149, <https://rscf.ru/project/25-29-01149/>.

Литература

1. Кузьмин Е.В. Эффективность режекции узкополосной помехи в задаче поиска шумоподобного сигнала при пороговом и поэлементном способах спектральной обработки. // Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA – 2023: Доклады XXV Международной конференции, Москва, 29–31 марта 2023 года. – Москва: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2023. – С. 144-147.
2. Тимофеев А.Л., Султанов А.Х. Повышение эффективности спектральной режекции узкополосных помех. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.7.5>
3. 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>
4. Timofeev A.L., Sultanov A.Kh., Meshkov I.K., Gizatulin A.R. Spectral image compression. // Optical Technologies for Telecommunications 2021. – SPIE, 2022. – Т. 12295. <https://doi.org/10.1117/12.2632146>
5. Тимофеев А.Л., Султанов А.Х., Мешков И.К., Гизатулин А.Р. Спектральный метод голографического помехоустойчивого кодирования. // Инфокоммуникационные технологии. – 2022. – № 1 (20). – С. 34-41.
6. Лялин К.С. Хасанов М.С., Мелешин 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>

7. 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>
8. Калинин В.И., Чапурский В.В. Передача информации на основе шумовых сигналов со спектральной модуляцией. // Радиотехника и электроника. – 2015. – № 10 (60). – С. 1025–1035.
9. Быстров Р.П., Кузьмичев В.Е., Романовский А.С., Соколов С.А., Соколов Ю.В., Федорова Л.В. Предложения по технической реализации устройств шумовых РЛС со спектральной обработкой сигналов. // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – № 5.
10. Макаренко В. Новые сверхвысокочастотные АЦП компании Analog Devices. // Компоненты и технологии. – 2018. – №. 9. – С. 36-39.
11. Глушков А.Н. и др. Цифровой демодулятор сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией. // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2023.– № 5 (19). – С. 115-120.
12. Патент № 2713865 С1 Российская Федерация, МПК H03D 1/24. Способ демодуляции амплитудно-модулированного сигнала : № 2019117242 : заявл. 04.06.2019 : опубл. 07.02.2020 / Дунилин В.М.
13. Тимофеев А.Л., Султанов А.Х. Построение помехоустойчивого кода на базе голографического представления произвольной цифровой информации. // Компьютерная оптика. – 2020. – № 6 (44). – С. 978-984. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-739>

Для цитирования:

Тимофеев А.Л., Султанов А.Х., Мешков И.К., Гизатулин А.Р. Расширение спектральных методов обработки сигналов кодирования. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.4.15>