

АМПЛИТУДНО-ИМПУЛЬСНАЯ И ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Осадчий И.В., студент гр.461401

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Фильченкова Т.М. – старший преподаватель каф. ЗИ

Аннотация. В работе исследуются импульсные методы модуляции амплитудно-импульсная (АИМ) и широтно-импульсная модуляция (ШИМ). Проведено моделирование формирования ШИМ-сигнала и выполнен анализ его временных и спектральных характеристик. Показано наличие спектральных составляющих на частоте информационного сигнала и гармониках несущей. Также выполнена оценка помехоустойчивости при воздействии аддитивного белого шума и исследована зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум. Результаты подтверждают устойчивость ШИМ-сигнала к шумовым воздействиям и возможность его применения в системах управления и передачи данных.

Ключевые слова. Широтно-импульсная модуляция, амплитудно-импульсная модуляция, ШИМ-сигнал, спектральный анализ, коэффициент заполнения, помехоустойчивость, аддитивный белый шум, отношение сигнал/шум, вероятность битовой ошибки, цифровая передача сигналов.

В условиях стремительного развития цифровых технологий и роста объемов передаваемой информации особую актуальность приобретают методы преобразования аналоговых сигналов в форму, пригодную для цифровой обработки и передачи по каналам связи. Современные системы дистанционного управления, автоматизации технологических процессов, робототехники и беспилотных летательных аппаратов требуют высокой надёжности, помехоустойчивости и защищённости каналов передачи управляющих сигналов. В этой связи импульсные методы модуляции занимают важное место в теории электрической связи и практике построения телекоммуникационных систем. Амплитудно-импульсная и широтно-импульсная модуляции относятся к числу базовых способов представления аналоговой информации в импульсной форме. Они широко применяются в системах управления электроприводами, источниках вторичного электропитания, преобразователях энергии, а также в каналах передачи управляющих воздействий.

Амплитудно-импульсная модуляция представляет собой способ кодирования информации, при котором амплитуда периодически повторяющихся импульсов изменяется пропорционально мгновенному значению аналогового сигнала, тогда как их длительность и период повторения остаются постоянными [1].

$$U_{\text{АИМ}}(t) = U(1 + m \sin \Omega t) \left(\frac{1}{Q} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2}{k\pi} \sin \frac{k\pi}{Q} \cos k\omega_1 t \right), \quad (1)$$

где U – амплитуда сигнала; m – коэффициент глубины модуляции; k – коэффициент пропорциональности; Q – скважность сигнала.

Такой подход обеспечивает простоту реализации и позволяет осуществлять дальнейшее квантование сигнала, однако делает систему чувствительной к амплитудным помехам, что особенно критично в условиях зашумлённых каналов связи.

Широтно-импульсная модуляция основана на ином принципе: амплитуда импульсов фиксирована, а информационным параметром является их длительность. Коэффициент заполнения определяется как отношение длительности импульса к периоду повторения [1].

$$U_{\text{ШИМ}}(t) = U \left(\frac{\tau + \Delta\tau \sin \Omega t}{T_1} + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sin \left(k\pi \frac{\tau + \Delta\tau \sin \Omega t}{T_1} \right) \cos k\omega_1 t \right), \quad (2)$$

где U – амплитуда сигнала; τ – длительность импульса; $\Delta\tau$ – максимальное приращение ширины импульса.

Благодаря тому, что информация переносится во временную область, ШИМ обладает большей устойчивостью к амплитудным искажениям и широко применяется в системах управления электроприводами, импульсных источниках питания, а также в каналах дистанционного управления беспилотными летательными аппаратами.

Для исследования характеристик сигналов было выполнено моделирование в среде Python. В качестве модулирующего сигнала использована синусоида частотой 50 Гц. На основе дискретизации

был сформирован АИМ-сигнал, представляющий собой последовательность импульсов с амплитудой, пропорциональной значению исходного сигнала в моменты отсчёта. На рисунке 1 приведена осциллограмма исходного аналогового сигнала и осциллограмма сигнала АИМ.

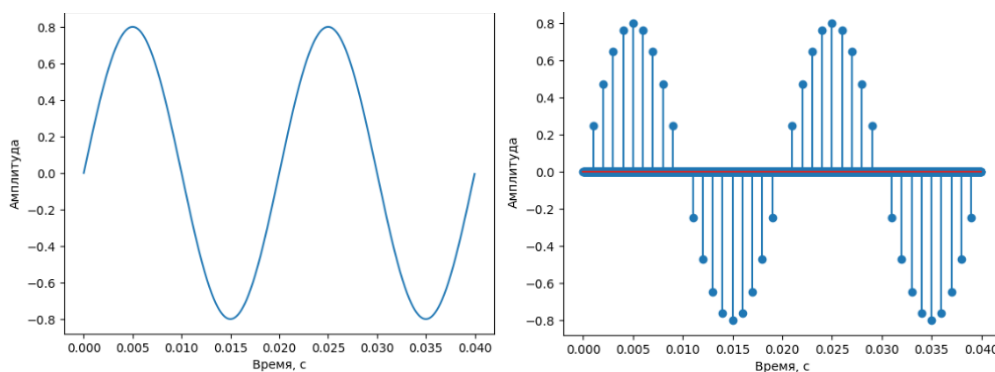


Рисунок 1 – Осциллограмма исходного аналогового сигнала и осциллограмма сигнала АИМ

Далее был реализован процесс формирования ШИМ-сигнала методом сравнения аналогового сигнала с пилообразным опорным напряжением. Демодуляция осуществлялась с помощью цифрового фильтра нижних частот. Полученный сигнал после фильтрации повторяет форму исходной синусоиды с допустимой погрешностью, что подтверждает корректность модели и принцип восстановления аналоговой информации из ШИМ-последовательности [2]. На рисунке 2 показана осциллограмма ШИМ-сигнала и осциллограмма демодулированного ШИМ сигнала.

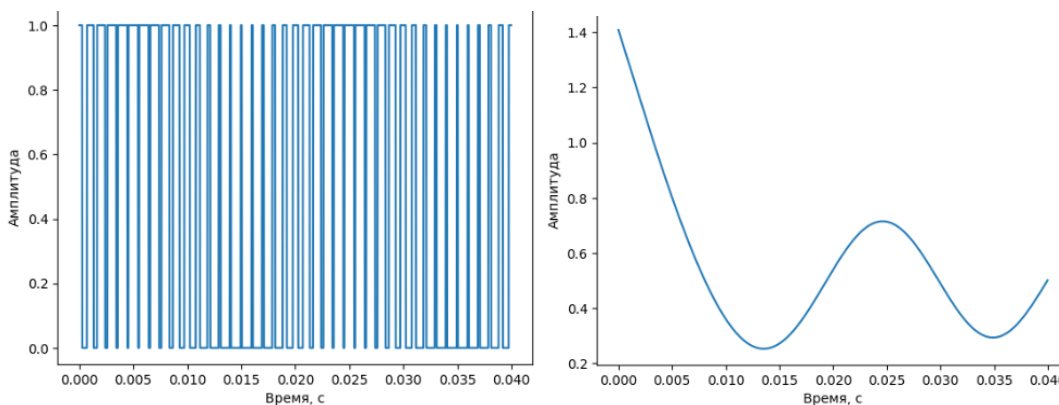


Рисунок 2 – Осциллограмма ШИМ-сигнала и осциллограмма демодулированного ШИМ сигнала

Спектральный анализ ШИМ-сигнала показал наличие выраженной составляющей на частоте информационного сигнала, а также спектральных линий на частоте несущей и её гармониках. Расширение спектра по сравнению с исходным сигналом обусловлено импульсной природой модуляции. Дополнительно была проведена оценка помехоустойчивости путём моделирования аддитивного белого шума и расчёта зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум. Полученный график демонстрирует снижение вероятности ошибки при увеличении отношения сигнал/шум, что подтверждает устойчивость ШИМ к шумовым воздействиям. При высоких значениях отношения сигнал/шум вероятность ошибки стремится к нулю, что делает данный метод перспективным для применения в системах управления, требующих высокой надёжности передачи команд. На рисунке 3 представлен амплитудный спектр ШИМ-сигнала и показана зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум.

С точки зрения информационной безопасности канал ШИМ представляет особый интерес. Поскольку информация закодирована во временной длительности импульсов, незначительное изменение их ширины может использоваться для скрытого внедрения дополнительных данных. Такие изменения могут быть практически незаметны для стандартных алгоритмов управления, но при этом позволяют реализовать скрытый канал передачи информации [3]. Это создаёт потенциальную угрозу для систем дистанционного управления дронами, промышленными объектами и элементами критической инфраструктуры. Внедрение скрытых команд или управляющих последовательностей через модификацию коэффициента заполнения может привести к нарушению устойчивости системы или выполнению несанкционированных действий.

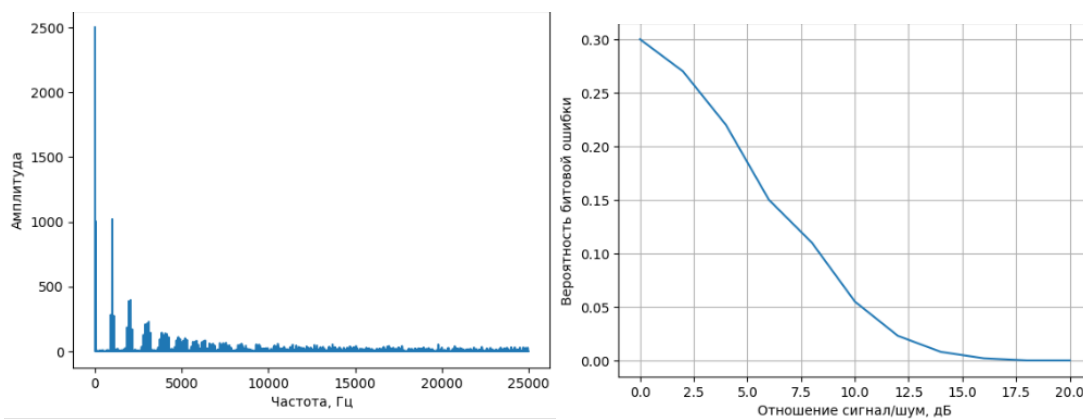


Рисунок 3 – Амплитудный спектр ШИМ-сигнала и зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум

Для обнаружения подобных искажений предложен метод контроля целостности сигнала, основанный на статистическом анализе длительности импульсов. В процессе работы системы принимается последовательность импульсов ШИМ за заданный интервал наблюдения, после чего для каждого импульса определяется его длительность t_i и период повторения T_i . На основании этих параметров для каждого периода вычисляется коэффициент заполнения, который определяется выражением:

$$D_i = \frac{t_i}{T_i}. \quad (3)$$

После определения коэффициентов заполнения для всей последовательности из N импульсов вычисляется их среднее значение:

$$\bar{D} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i. \quad (4)$$

Далее определяется дисперсия коэффициентов заполнения, характеризующая степень отклонения длительностей импульсов от среднего значения:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_i - \bar{D})^2. \quad (5)$$

Полученное значение дисперсии сравнивается с эталонным значением σ^2 , соответствующим нормальному режиму функционирования системы. Если разность между текущим и эталонным значением дисперсии превышает допустимый порог, то фиксируется возможное нарушение целостности передаваемого сигнала. Дополнительно может применяться спектральный анализ последовательности импульсов, позволяющий выявлять появление побочных гармоник, возникающих при систематическом изменении длительности импульсов. Для повышения уровня защиты системы возможно использование криптографических методов контроля, например формирование цифровой подписи пакетов импульсов или вычисление контрольной хеш-суммы последовательности коэффициентов заполнения, что позволяет обнаруживать несанкционированные изменения параметров сигнала.

Таким образом, проведённое исследование показало, что амплитудно-импульсная и широтно-импульсная модуляции являются эффективными методами представления аналоговой информации в импульсной форме, при этом ШИМ обладает большей помехоустойчивостью и энергетической эффективностью. Одновременно временная природа кодирования создаёт потенциальные возможности для скрытого внедрения информации, что требует разработки специализированных методов контроля целостности. Полученные результаты подтверждают необходимость комплексного подхода к защите каналов связи, сочетающего методы теории электрической связи и инструменты информационной безопасности.

Список использованных источников:

1. Сорока, Н. И. Телемеханика. Линии связи и безопасность устройств и сетей: учеб. пособие / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко, Е. В. Тарасюк. – Минск: БГУИР, 2023. – 240 с.
2. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. пособие для вузов / С. И. Баскаков. – М.: Высшая школа, 2000. – 462 с.
3. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – 2-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.