

DOI 10.37882/2223-2966.2025.08.12

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ-ШУМ В СИСТЕМАХ РАДИОСВЯЗИ С ЦИФРОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ СИГНАЛА ПО МЕТОДУ КОМПЛЕКСНОЙ ОГИБАЮЩЕЙ

FEATURES OF DETERMINING THE SIGNAL-TO-NOISE RATIO IN RADIO COMMUNICATION SYSTEMS WITH DIGITAL SIGNAL MODULATION BY THE COMPLEX ENVELOPE METHOD

D. Kalistratov
D. Mitrofanov

Summary. The problem of determining the signal-to-noise ratio by the complex envelope method is considered. The mathematical apparatus of the method is analyzed. The general principles of analog and digital radio signal modulation are revealed, and their mathematical representation is presented. The differences in the application of the complex envelope method in relation to signals with analog and digital modulation are indicated. The structural schemes of digital modulators are presented, and their brief description is given. Expressions for finding the amplitudes of modulated digital signals are specified. The features of the application of the complex envelope method for radio communication systems with amplitude, frequency and phase digital signal modulation are revealed. Recommendations are given regarding the measurement of the signal-to-noise level in digitally modulated signals.

Keywords: wireless communication system, radio signal, digital modulation, signal-to-noise ratio, complex envelope method.

Калистратов Дмитрий Сергеевич

Кандидат технических наук,
независимый исследователь, г. Тула
kalistratow@list.ru

Митрофанов Дмитрий Геннадьевич

Доктор технических наук, профессор,
Военная академия войсковой ПВО Вооруженных Сил РФ
имени Маршала Советского Союза А.М. Василевского,
г. Смоленск
mdgvapvo@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается задача определения отношения сигнал-шум методом комплексной огибающей. Анализируется математический аппарат метода. Раскрываются общие принципы аналоговой и цифровой модуляции радиосигнала, излагается их математическое представление. Указываются различия в применении метода комплексной огибающей по отношению к сигналам с аналоговой и цифровой модуляцией. Приводятся структурные схемы цифровых модуляторов, даётся их краткое описание. Указываются выражения для нахождения амплитуд модулируемых цифровых сигналов. Выявляются особенности применения метода комплексной огибающей для систем радиосвязи с амплитудной, частотной и фазовой цифровой модуляцией сигнала. Даются рекомендации относительно измерения уровня сигнал-шум в сигналах с цифровой модуляцией.

Ключевые слова: беспроводная система связи, радиосигнал, цифровая модуляция, отношение сигнал-шум, метод комплексной огибающей.

Введение

Одним из важнейших параметров качества радиоканала в беспроводных системах связи [1–4] является отношение сигнал-шум на входе приёмного устройства [5–7]. Наиболее распространённым методом определения отношения сигнал-шум, в свою очередь, является метод комплексной огибающей сигнала [8]. При этом важно иметь в виду, что для системы с аналоговой модуляцией низкое качество связи приводит лишь к снижению качества информации, например звука или видео, что не является критичным. В системе же с цифровой модуляцией низкое качество связи может привести к частичной или даже полной потере информационного пакета, поскольку искажаются биты данных и файловых заголовков. В этой связи значительный интерес представляет изучение метода комплексной огибающей применительно к радиоканалам с цифровой модуляцией сигнала.

Метод комплексной огибающей

Комплексной огибающей сигнала называют комплексную функцию $Z(t)$ действительного аргумента t , описывающую амплитуду и фазу сигнала в зависимости от времени. Это достигается за счёт исключения из рассмотрения частотного множителя. Комплексная огибающая широко используется при оценке отношения сигнал-шум на входе приёмного устройства. Поясним понятие комплексной огибающей. Известно, что гармонический косинусоидальный сигнал имеет 3 параметра: амплитуду, частоту и фазу. Рассмотрим общий случай, когда все три параметра сигнала изменяются во времени:

$$s(t) = A(t)\cos(\omega(t)t + \varphi(t)), \quad (1)$$

где: $s(t)$ — полезный сигнал; $A(t)$ — амплитуда; $\omega(t)$ — круговая частота; $\varphi(t)$ — фаза; t — время.

Если изменяется только амплитуда $A(t)$, то имеем амплитудную модуляцию. Если изменяется только частота $\omega(t)$, то имеем частотную модуляцию. Если изменяется только фаза $\varphi(t)$, то имеем фазовую модуляцию. Если изменяемый параметр описывается гладкой непрерывной функцией, то получаем аналоговую модуляцию. Если изменяемый параметр описывается составной ступенчатой функцией, то получаем цифровую модуляцию (манипуляцию).

Введём в рассмотрение комплексную функцию $z(t)$ действительного аргумента t :

$$z(t) = A(t)\cos(\omega(t)t + \varphi(t)) + jA(t)\sin(\omega(t)t + \varphi(t)). \quad (2)$$

Действительную часть данной функции условно называют синфазным компонентом комплексной огибающей, а мнимую часть — квадратурным компонентом. Используя формулу Эйлера для комплексной экспоненты, перепишем указанную функцию в виде:

$$z(t) = A(t)e^{j\varphi(t)}e^{j\omega(t)t}. \quad (3)$$

Тогда выражение комплексной огибающей примет вид:

$$Z(t) = A(t)e^{j\varphi(t)}, \quad (4)$$

где: $Z(t)$ — комплексная огибающая сигнала. Модуль $Z(t)$ характеризует функцию амплитуды. Аргумент $Z(t)$ характеризует функцию фазы. Отмечаем, что выражение комплексной огибающей содержит только 2 параметра — амплитуду и фазу. Частота $\omega(t)$ из рассмотрения исключается.

Суть метода комплексной огибающей заключается в использовании понятия комплексной огибающей для определения амплитуды полезного сигнала в оценке отношения сигнал-шум. Отношение сигнал-шум описывается выражением:

$$SNR = 20\lg\left(\frac{A_1}{A_2}\right), \quad (5)$$

где: A_1 — средняя амплитуда сигнала; A_2 — средняя амплитуда шума. При этом амплитуда сигнала A_1 определяется через комплексную огибающую $Z(t)$, а уровень шума A_2 определяется при отсутствии полезного сигнала. На практике для нахождения значений A_1 и A_2 применяются специальные устройства — шумомеры со встроенными детекторами огибающей.

Принцип аналоговой модуляции

Общий принцип аналоговой модуляции состоит в изменении одного из параметров модулируемого сигнала

модулирующим сигналом по заданному закону. При этом в случае аналоговой модуляции для модулируемого параметра используются гладкие непрерывные функции. Рассмотрим общие принципы аналоговой модуляции на примере сигнала с амплитудной аналоговой модуляцией. Пусть у нас имеются высокочастотный модулируемый сигнал с частотой ω_1 и низкочастотный модулирующий сигнал с частотой ω_2 :

$$s_1(t) = A_1 \cos(\omega_1 t), \quad s_2(t) = A_2 \cos(\omega_2 t), \quad (6)$$

где: $s_1(t)$ — модулируемый сигнал; $s_2(t)$ — модулирующий сигнал. Фазы сигналов для наглядности примем равными нулю. В случае амплитудной аналоговой модуляции задача модулирующего сигнала — изменять амплитуду модулируемого сигнала в соответствии с наперед заданным законом.

Для того, чтобы выполнить операцию модуляции в передатчике, модулируемый и модулирующий сигналы подаются на частотный смеситель. В качестве смесителя обычно используется биполярный транзистор, включенный по схеме усилителя с общим коллектором. Входная вольт-амперная характеристика биполярного транзистора описывается экспоненциальной зависимостью и в теории имеет производные бесконечного порядка. Нас, тем не менее, в данном случае интересуют только линейный и квадратичный компоненты. Представим результирующий сигнал выхода смесителя с помощью ряда Тейлора:

$$s(t) = k_1(A_1 \cos(\omega_1 t) + A_2 \cos(\omega_2 t)) + k_2(A_1 \cos(\omega_1 t) + A_2 \cos(\omega_2 t))^2, \quad (7)$$

где: k_1, k_2 — коэффициенты, характеризующие первую и вторую производную выходного напряжения по входному в рабочей точке транзистора. Данные коэффициенты могут быть определены экспериментальным путём, либо вычислены аналитически с помощью ВАХ транзистора. По смыслу, после смешения мы получаем линейное слагаемое и квадрат суммы модулируемого и модулирующего сигнала. Раскроем результирующий сигнал выхода смесителя подробнее:

$$s(t) = k_1 A_1 \cos(\omega_1 t) + k_1 A_2 \cos(\omega_2 t) + k_2 A_1^2 \cos^2(\omega_1 t) + 2k_2 A_1 A_2 \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) + k_2 A_2^2 \cos^2(\omega_2 t). \quad (8)$$

После применения фильтров в сигнале передающего устройства остаются всего два слагаемых:

$$s(t) = k_1 A_1 \cos(\omega_1 t) + 2k_2 A_1 A_2 \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t). \quad (9)$$

Если используется передатчик с подавлением несущей, то, дополнительно подавляется (но не полностью) также первое слагаемое с несущей частотой ω_1 . В итоге на выходные каскады передатчика поступает сигнал:

$$s(t) = 2k_2 A_1 A_2 \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t). \quad (10)$$

В результате мы пришли к тому, с чего начинали рассуждения. Модулирующий сигнал изменяет амплитуду модулируемого сигнала $A(t)$ в соответствии с законом:

$$s(t) = A(t) \cos(\omega_1 t), \quad (11)$$

в котором:

$$A(t) = 2k_2 A_1 A_2 \cos(\omega_2 t). \quad (12)$$

Для того, чтобы показать принцип передачи аналогового амплитудно-модулированного сигнала в пространстве, вернёмся к выходному сигналу передатчика и выполним тригонометрическое преобразование:

$$\begin{aligned} s(t) &= 2k_2 A_1 A_2 \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) = \\ &= k_2 A_1 A_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t) + k_2 A_1 A_2 \cos((\omega_1 + \omega_2)t). \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом, низкочастотный сигнал переносится на несущую частоту. На вход приёмника поступают два высокочастотных компонента — суммарный и разностный. Эти компоненты располагаются симметрично слева и справа от значения несущей частоты.

В приёмнике имеются свой автогенератор сигнала несущей частоты и свой смеситель. После выполнения операции смешения в приёмнике модулирующий сигнал переносится обратно в начало координат. В результате смешения и фильтрации высокая частота несущей ω_1 устраняется, а низкочастотный модулирующий сигнал с частотой ω_2 , использовавшийся в передатчике, восстанавливается в приёмнике с точностью до некоторого коэффициента пропорциональности. На практике вместо единственной модулирующей гармоники с частотой ω_2 используется несколько гармоник. Таким образом, по радиоканалу передаются звуковые и видео сигналы.

Задачей метода комплексной огибающей здесь является выделение низкочастотного сигнала и определение среднего значения его амплитуды на некотором временном интервале. Если шумомер обладает встроенным детектором огибающей, то, он позволяет вычислять

отношение сигнал-шум на входе приёмного устройства. Если детектор огибающей в шумомере отсутствует, то уровень полезного сигнала должен вычисляться в тракте приёмного устройства после прохождения входным сигналом частотного смесителя.

Принцип цифровой модуляции

При переходе к цифровой модуляции общий принцип модуляции сохраняется — один из параметров модулируемого сигнала изменяется модулирующим сигналом по заданному закону. Различие состоит в типе функций, которыми описываются изменения модулируемого параметра. При цифровой модуляции, в отличие от аналоговой, для задания законов изменения модулируемого параметра вместо гладких непрерывных функций используются ступенчатые функции с резкими переходами. В результате, отличительной особенностью сигналов с цифровой модуляцией является наличие в них разрывов первого рода, которым на графиках соответствуют резкие скачки по амплитуде, частоте или фазе.

К примеру, для того, чтобы передавать бинарные послы с помощью сигнала с амплитудной цифровой модуляцией (рисунок 1), необходимо иметь всего 2 уровня амплитуды $A(t)$, соответствующие логическим 0 и 1. Аналогично, в случае частотной цифровой модуляции необходимо иметь два переключаемых значения частоты, а в случае фазовой цифровой модуляции — два переключаемых значения фазы.

Для радиоканала с цифровой модуляцией сигнала качество связи намного более критично, нежели чем для радиоканала с аналоговой модуляцией. В аналоговой системе низкое значение отношения сигнал-шум приводит к небольшому искажению полезного сигнала, но не влечёт «катастрофических» последствий. В цифровой же системе степень «вреда» низкого качества связи зависит от того, какие именно биты цифровой послы «повреждены». Результатом может быть как небольшое искажение данных, так и полная потеря файла.

В этой связи особый интерес представляет выявление особенностей определения отношения сигнал-шум

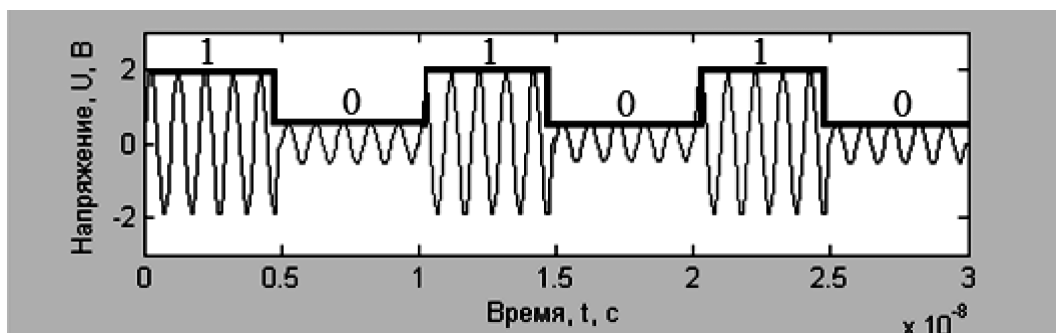


Рис. 1. Пояснение принципа цифровой модуляции на примере сигнала с амплитудной цифровой модуляцией

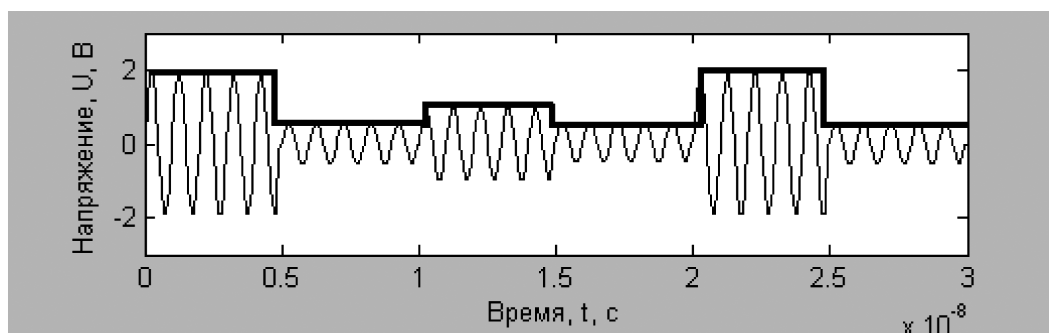


Рис. 2. Сигнал с амплитудной цифровой модуляцией

в системах радиосвязи с цифровой модуляцией сигнала по методу комплексной огибающей. Проанализируем специфику и особенности применения метода комплексной огибающей по отношению к сигналам с амплитудной, частотной и фазовой цифровой модуляцией сигнала.

Амплитудная цифровая модуляция

При амплитудной цифровой модуляции (ASK) информация передаётся за счёт дискретного изменения амплитуды $A(t)$ модулируемого сигнала (рисунок 2). Имеется конечный алфавит (ансамбль) амплитуд. Каждому символу алфавита соответствует свой уникальный уровень амплитуды. При переходе от одного символа к другому амплитуда меняется скачкообразно. Огибающая амплитуды — ступенчатая функция.

Основными элементами амплитудного модулятора являются генератор и аналоговый перемножитель (рисунок 3). Генератор вырабатывает опорное высокочастотное колебание. Модулирующий сигнал подаётся от управляющего устройства. Роль перемножителя заключается в получении компонента с произведением сигналов, аналогично тому, как это делалось в смесителе для сигнала с аналоговой модуляцией. На схеме использованы следующие обозначения: Γ — генератор; Y — усилитель; $УУ$ — управляющее устройство; $УВЧ$ — усилитель высокой частоты; $u_1 \dots u_4$ — сигналы.

Выражение для нахождения модуля комплексной огибающей сигнала с амплитудной цифровой модуляцией выглядит следующим образом:

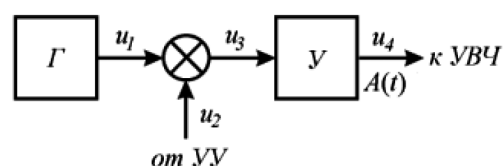


Рис. 3. Структурная схема амплитудного цифрового модулятора

$$|Z(t)| = \sqrt{A^2(t)\cos^2(\varphi) + A^2(t)\sin^2(\varphi)} = A(t). \quad (14)$$

Поскольку график амплитуды $A(t)$ представляется ступенчатой функцией, то отношение сигнал-шум в данном случае целесообразно измерять при минимальном ненулевом значении амплитуды.

Частотная цифровая модуляция

При частотной цифровой модуляции (FSK) информация передаётся за счёт дискретного сгущения и разрежения гармоник модулируемого сигнала вследствие изменения его частоты (рисунок 4). Имеется конечный алфавит (ансамбль) частот. Каждому символу алфавита соответствует своё уникальное значение частоты. При переходе от одного символа к другому частота меняется скачкообразно. Огибающая амплитуды — прямая линия.

Для того, чтобы иметь возможность влиять на частоту модулируемого сигнала в схему автогенератора на стороне передачи обычно встраивают чувствительный элемент (рисунок 5), параметр которого управляется на-

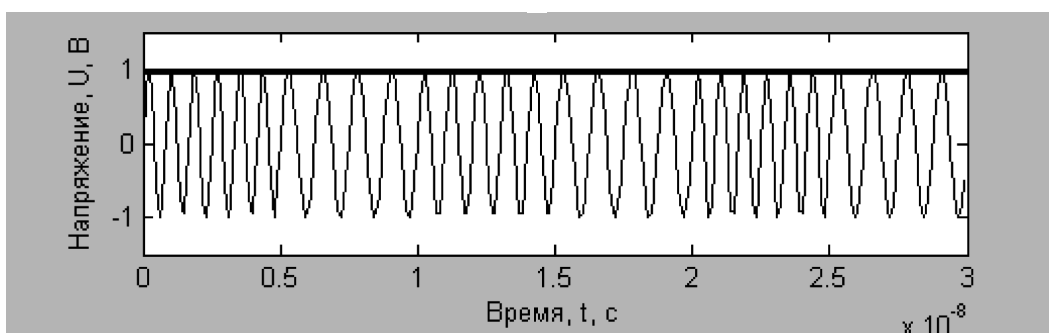


Рис. 4. Сигнал с частотной цифровой модуляцией

пряжением модулирующего сигнала. На схеме использованы следующие обозначения: УУ — управляющее устройство; ЧЭ — чувствительный элемент; Г — генератор; УВЧ — усилитель высокой частоты; u_1, u_2 — сигналы.

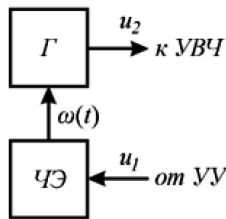


Рис. 5. Структурная схема частотного цифрового модулятора

Выражение для нахождения модуля комплексной огибающей сигнала с частотной цифровой модуляцией выглядит следующим образом:

$$|Z(t)| = \sqrt{A^2 \cos^2(\varphi) + A^2 \sin^2(\varphi)} = A. \quad (15)$$

Поскольку график амплитуды $A(t)$ представляется постоянным значением, то, в данном случае отношение сигнал-шум допустимо измерять стандартным образом, без учёта каких-либо дополнительных аспектов, то есть, так же как и при аналоговой модуляции.

Фазовая цифровая модуляция

При фазовой цифровой модуляции (PSK) информация передаётся за счёт дискретных изменений фазы модулируемого сигнала (рисунок 6). Имеется конечный алфавит (ансамбль) фаз. Каждому символу алфавита соответствует своё уникальное значение фазы. При переходе от одного символа к другому фаза меняется скачкообразно. Огибающая амплитуды — прямая линия.

Фазовый модулятор в одном из вариантов строится на основе мультиплексора гармонических сигналов со смещёнными фазами. Фазовое «разветвление» исходного гармонического сигнала, получаемого от автогенератора, осуществляется аппаратно (рисунок 7). На схеме использованы следующие обозначения: Г — генератор; ФФ — дискретный фазовый формирователь; МХ — мульт

типлексор; УУ — управляющее устройство; УВЧ — усилитель высокой частоты; $u_1 \dots u_4$ — сигналы.

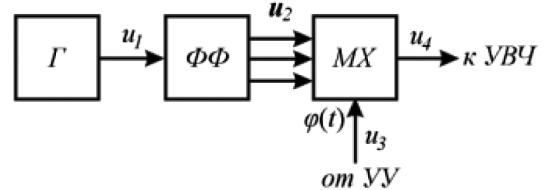


Рис. 7. Структурная схема фазового цифрового модулятора

Выражение для нахождения модуля комплексной огибающей сигнала с фазовой цифровой модуляцией выглядит следующим образом:

$$|Z(t)| = \sqrt{A^2 \cos^2(\varphi(t)) + A^2 \sin^2(\varphi(t))} = A. \quad (16)$$

Поскольку график амплитуды $A(t)$ представляется постоянным значением, то отношение сигнал-шум допустимо измерять стандартным образом, без учёта каких-либо дополнительных аспектов, аналогично предыдущему случаю с частотной модуляцией.

Заключение

В ходе проведённых исследований были проанализированы особенности определения отношения сигнал-шум в системах радиосвязи с цифровой модуляцией сигнала по методу комплексной огибающей. Рассмотрена амплитудная, частотная и фазовая цифровая модуляция. Продемонстрировано, что отличительной особенностью сигналов с цифровой модуляцией является наличие в них разрывов первого рода, которым на графиках соответствуют скачки по амплитуде, частоте, или фазе.

Показано, что в стационарных системах связи с частотной и фазовой цифровой модуляцией уровни амплитуды являются постоянными, а измерение отношения сигнал-шум не требует учёта дополнительных аспектов, что подтверждается математически. Для определения отношения сигнал-шум в системах связи с цифровой амплитудной модуляцией, в свою очередь, рекомендовано использование наименьшего ненулевого уровня амплитуды с целью обеспечения наивысшей достоверности результата.

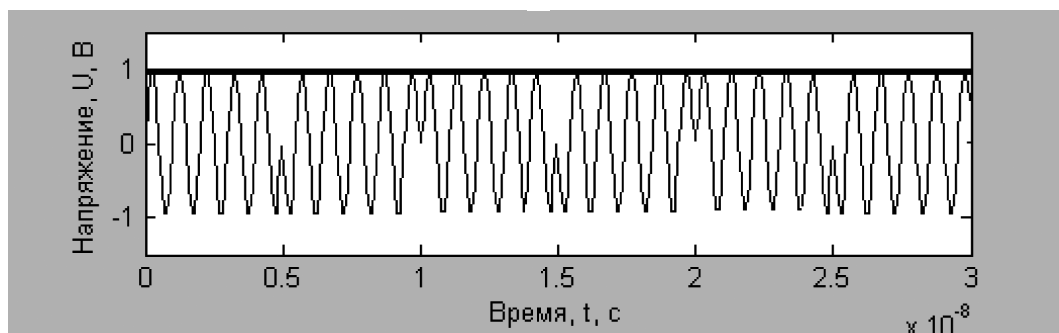


Рис. 6. Сигнал с фазовой цифровой модуляцией

ЛИТЕРАТУРА

1. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи. —издание второе, исправленное и дополненное. — М.: Техносфера, 2006. — 288 с.
2. Cardoso F.D., Lipovac V., Correia L.M. Wireless technologies for the connectivity of the future // EURASIP Journal on Wireless Communication and Networking. — 2021. — №. 118.
3. Зайцев А.В., Митрофанов Д.Г., Тимофеев И.А., Красавцев О.О., Кичулкин Д.А., Терещенко А.А., Азаров В.С., Черников А.К., Чижов А.А. Система радиосвязи со сверхширокополосными сигналами // Патент на изобретение №2580070.— 2016. — Бюл. №. 10.
4. Калистратов Д.С. О передаче видеоизображений по радиоканалу с различными типами цифровой модуляции сигнала // Актуальная наука: Международный научный журнал. — 2018.— Т. 10. — №. 15.— С. 36–39.
5. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г. Теоретические основы обработки сигналов в беспроводных системах связи: монография. — Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011. — 368 с.
6. Калистратов Д.С., Минаков Е.И., Киселев А.П. Способ оценки отношения сигнал-шум на входе приёмного устройства для радиосигнала с цифровой амплитудной модуляцией // Патент России на изобретение №2695953.— 2019. — Бюл. №. 22.
7. Rojas A.J., Garcés H.O. Signal-to-Noise Ratio Based Fault Detection and Identification // Front. Control. Eng. — 2021.— Т. 3. — №. 806558.
8. Шевгунов Т.Я. Частотный анализ электрических цепей: Метод комплексных амплитуд: учебное пособие. — М.: ЛЕНАНД, 2014. — 312 с.

© Калистратов Дмитрий Сергеевич (kalistratow@list.ru); Митрофанов Дмитрий Геннадьевич (mdgvapvo@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»