**Элементы цифровой обработки сигналов применительно к цифровой радиосвязи**

# Представление сигнала в комплексной форме

В общем виде модулированный сигнал имеет вид:

s(t) = A(t)\*cos(ωt+ϕ(t)) (1)

A(t) – амплитуда, ω – угловая частота несущей (волны), ϕ(t) – начальная фаза. Модуляция заключается в изменении параметров несущей во времени – амплитуды, частоты и фазы.

Как правило, частота изменения A(t) и ϕ(t) в разы меньше ω.

Частотную модуляцию не рассматриваем, ибо она не используется в цифровой мобильной связи 3-5 поколений.

Формулу (1) можно переписать, чтобы чётче отделить несущую от модулирующего сигнала:

s(t) = A(t)(cos(ωt)cos(ϕ(t))-sin(ωt)sin(ϕ(t))) =

Re[A(t)(cos(ωt)+jsin(ωt))(cos(ϕ(t))+jsin(ϕ(t)))]

= Re[(A(t)ejϕ(t))ejωt] = ½(A(t)ejωt- A\*(t)e-jωt) (2)

Здесь j – мнимая единица (так она обозначается в электротехнике, ибо буквой i обозначается ток), A(t) – комплексная амплитуда, включающая в себя как собственно амплитуду, так и начальную фазу сигнала, \* - комплексное сопряжение.

На основе формулы (2) можно построить *универсальную схему квадратурного модулятора*, реализующего *все* виды амплитудно-фазовой модуляции (BPSK, QPSK, QAM). Рисунок 1 взят из Сети. Здесь 2πf0 = ω0 – частота несущей.

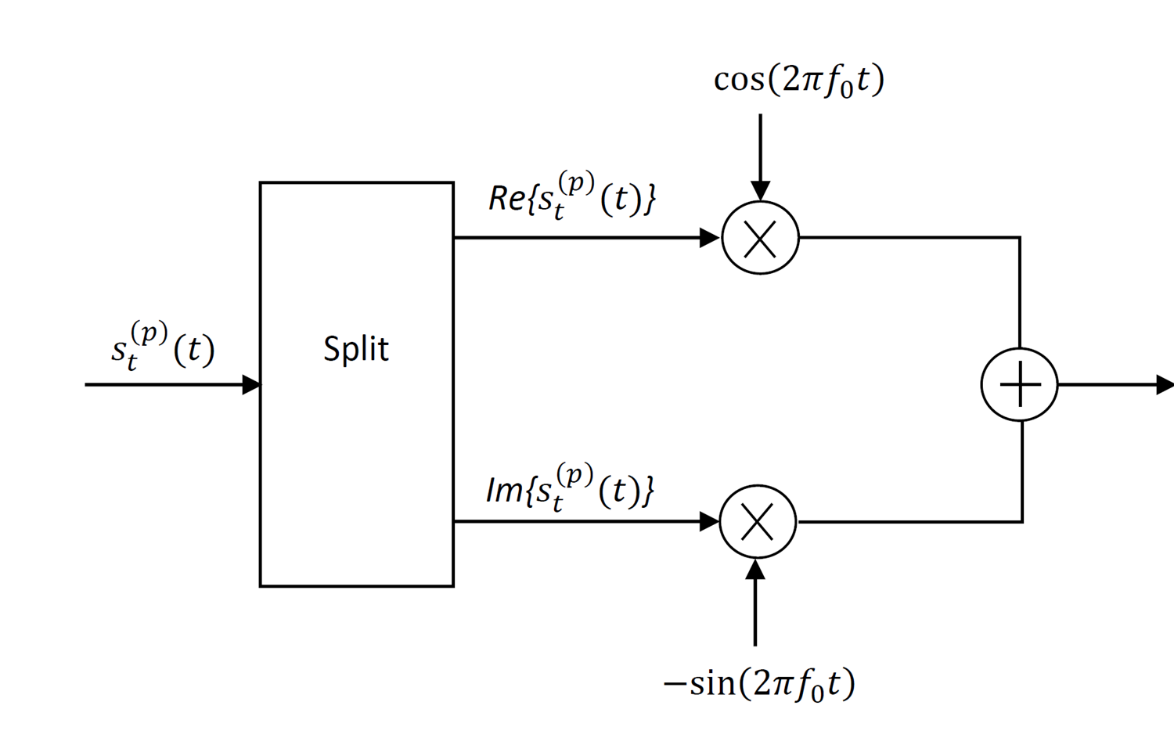


Рисунок . Универсальный квадратурный модулятор

Примеры формы сигнала s(p)(t) для конкретных видов модуляции приведены в лекции 1 по курсу «Введение в 5G».

Комплексное представление сигнала применяется и в приёмнике, при переносе спектра с несущей частоты. Также – при анализе прохождения сигнала через различные цепи. Комплексное представление позволяет одновременно отразить изменение амплитуды т сдвиг фазы при прохождении через цепь.

# Измерение уровня сигнала. Децибелы.

Внутри схемы передатчика и приёмника при описании алгоритмов обработки сигнал s(t) представляется в виде значения *напряжения* (или силы тока). На выходе передатчика (и на входе приёмника) существенна *мощность* сигнала.

Отношение мощностей в децибелах: R = 10\*lg(P1/P2). Для напряжений: R = 20\*lg(U1/U2).

Причины использования логарифмической шкалы:

* мощности (напряжения), встречающиеся в радиотракте, могут отличаться в 1012 раз и более; удобнее работать с небольшими числами;
* при прохождении сигнала через несколько стадий (каскад усиления, канал и т.д.) коэффициенты усиления (ослабления) на каждой стадии в децибелах складываются, а не перемножаются, упрощая работу исследователю;
* исторические причины: человеческое ухо (и глаз) имеют логарифмическую характеристику восприятия сигнала в зависимости от его мощности.

Абсолютный уровень сигнала в децибелах указывается по отношению к заранее заданному эталонному значению. Например, если мощность указывается в дБм (англ. dBm), в качестве P2 принимается мощность в 1 мВт.

Подробности см., например, в <https://rohdeschwarz.su/pics/%D0%92%D1%81%D0%B5%20%D1%87%D1%82%D0%BE%20%D0%B2%D1%8B%20%D1%85%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B8%20%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D1%82%D1%8C%20%D0%BE%20%D0%B4%D0%B5%D1%86%D0%B8%D0%B1%D0%B5%D0%BB%D0%B0%D1%85%20%D0%BD%D0%BE%20%D0%B1%D0%BE%D1%8F%D0%BB%D0%B8%D1%81%D1%8C%20%D1%81%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%81%D0%B8%D1%82%D1%8C.pdf>

# Энергия и мощность сигнала

Если s(t) – напряжение, то мгновенная мощность p(t) = s2(t)/R, R-сопротивление нагрузки. В теории обработки сигналов, так как нас интересует не абсолютное значение, а сравнение сигналов в пределах одной схемы, принимается R = 1 Ом, p(t) = s2(t).

Энергия сигнала: . Для передаваемого символа энергия, очевидно, конечна (сигнал для символа конечен и отличен от нуля конечное время) (*энергетический сигнал*).

Для периодических и случайных сигналов, существующих всегда, энергия бесконечна, но конечна средняя мощность:

Такие сигналы называются *мощностными*. Замечание. Для периодического сигнала среднее можно брать по периоду.

# Учёт шума (помех)

Основной предмет рассмотрения шума в теории связи – *аддитивный* шум: z(t) = s(t) + n(t). s(t) переданный полезный сигнал, n(t) – шум/помехи. Мультипликативный шум возникает, например, при замираниях в радиоканале, и рассматривается отдельно [Скляр, глава 15].

Классический вид шума в теории связи – *белый гауссовский шум*. Плотность вероятности этого шума – функция распределения Гаусса, среднее 0, дисперсию обозначим σ2. Дополнительное условие – спектральная плотность белого шума постоянна во всём диапазоне частот от -∞ до +∞, обозначим её как N0/2. То есть, мощность шума в полосе W Гц равна N0\*W Вт. Почему шум называется белым? По аналогии с белым светом, в котором присутствуют все частоты видимого диапазона световых волн.

# Отношение сигнал-шум для цифровой связи

См. [Скляр, п. 3.1.4]. Классическое определение SNR – отношение средней мощности сигнала к средней мощности шума, в предположении, что сигнал и шум бесконечны во времени. Для цифровой связи удобнее рассматривать ввести метрику качества, привязанную к передаче одного бита. Пусть бит передаётся за время Tb, при этом занимается полоса частот W, энергия на передачу бита равна Eb = S\*Tb, R=1/Tb – битовая скорость. Тогда

Или

Смотрите также [Скляр, п. 3.1.5]. Введение отношения сигнал/шум, нормированного на 1 бит, позволит сравнивать способы передачи с разным числом бит на символ.

# Канальное кодирование

ARQ – automatic repeat request

Бывает: stop and wait; непрерывный с возвратом, непрерывный с выборочным повтором

Аналогия со скользящим окном в TCP

Кодирование с избыточностью

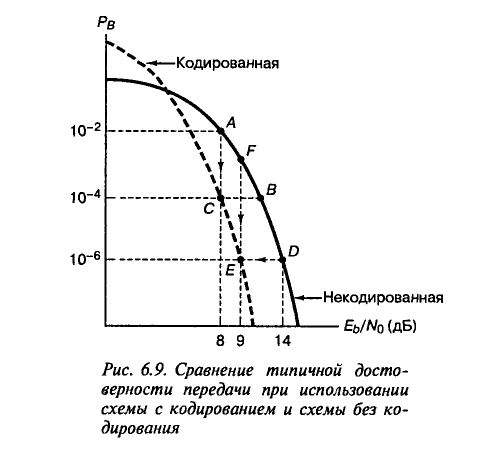
На k бит добавляется n-k проверочных бит, код обозначается (n,k).

Характеристики кода:

Избыточность (redundancy) (n-k)/k

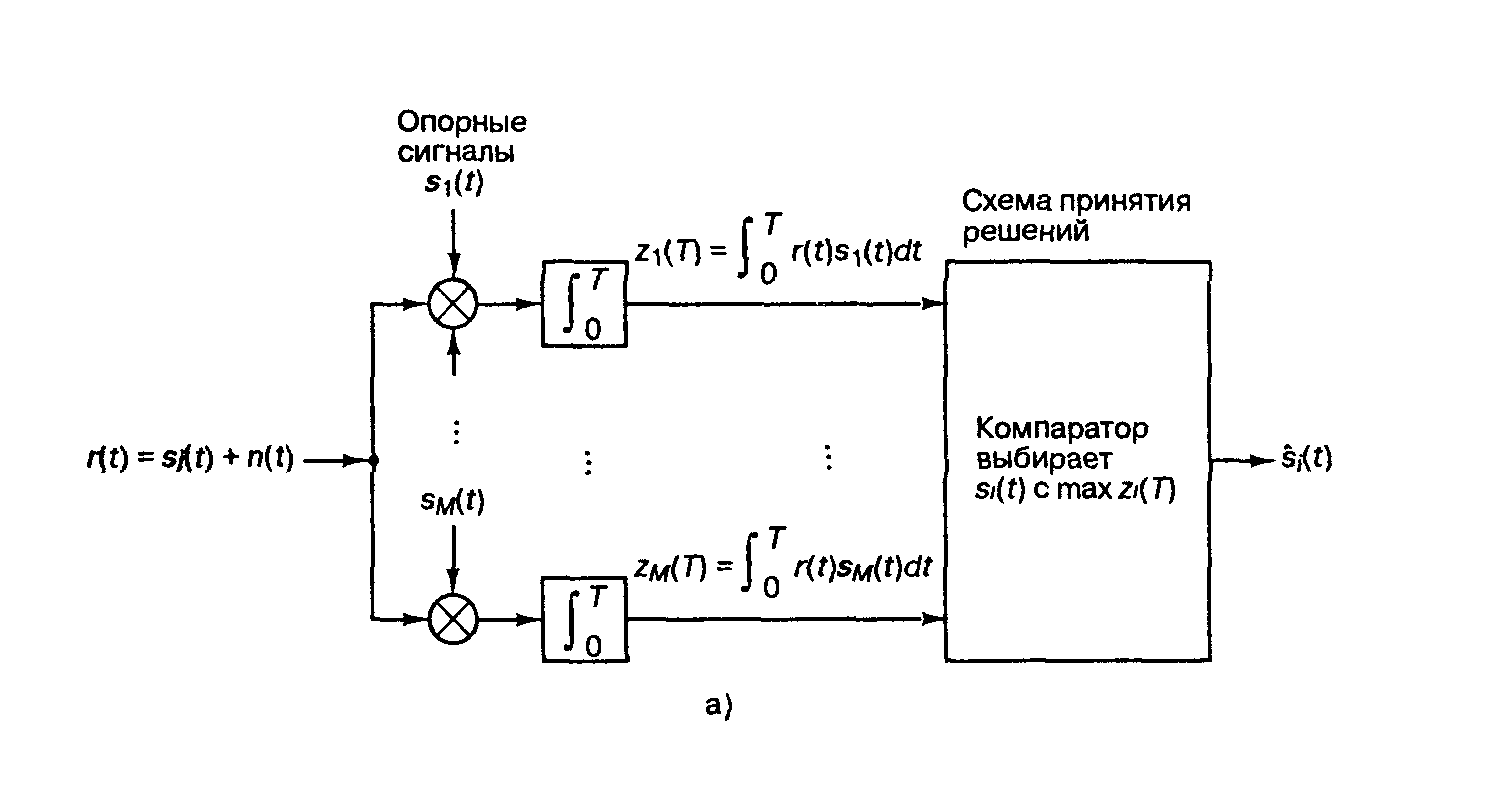
Скорость кодирования (code rate) k/n

Прямоугольный код M строк, N столбцов. Исправляет одну ошибку.



В общем виде

# Демодуляция в основной полосе (baseband). (Универсальный) корреляционный приёмник



См. [Скляр, 4.3.2]. На входе у нас сигнал с АБГШ. Пусть T – интервал передачи символа. Приёмник вычисляет коэффициент корреляции входного сигнала с каждым из опорных сигналов, соответствующих каждому из возможных символов (например, для PSK – их два, для QAM64 – 64, и т.д.). Принятым считается символ, для которого отклик коррелятора zi – наибольший.

Замечание 1. Опорные сигналы должны быть взяты с правильной начальной фазой, соответствующей начальной фазе несущей. Для решения этой задачи используются алгоритмы (и электрические цепи) *фазовой синхронизации*.

Замечание 2. Для некоторых видов модуляции возможно *некогерентное* детектирование без учёта начальной фазы несущей [Скляр, п. 4.5].

# Синхронизация приёмника и передатчика

# Перенос сигнала с радиочастоты и на радиочастоту

# Множественный доступ к каналу