

ВЕКТОРНЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ ЦЕПЕЙ И ГЕНЕРАТОРЫ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ В КОСМИЧЕСКОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ

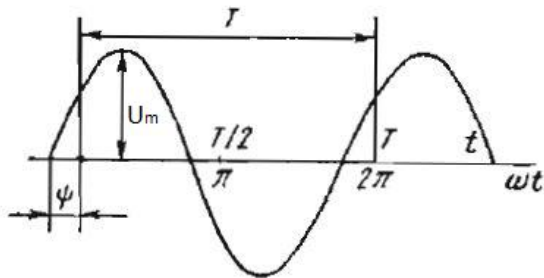
Желюков Илья
31 января 2020 г.

ROHDE & SCHWARZ

Make ideas real



КОРОТКИЕ И ДЛИННЫЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ



Амплитуда сигнала

Период / Частота

Фаза – величина, описывающая
величину сигнала в момент времени t

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

λ – длина волны
 v – скорость света = 300 тысяч км/сек.
 f – частота сигнала

Длинная линия – такая, где хотя бы уместается $\frac{1}{4}$ длины волны в длину.
Для систем питания переменного тока 60Гц длина кабеля должна превышать 825 км, чтобы эффекты распространения сигнала стали значительными.

ДИАПАЗОНЫ ЧАСТОТ И ДЛИН ВОЛН

Частота	Длина волны	Обозначение		Немецкое	Русское Полное	Со- кра- щен- ное
		Английское Полное	Со- кра- щен- ное			
30...300 кГц	10...1 км	Low Frequencis	LF	Langwellen	Километровые	НЧ
0,3...3,0 МГц	1...0,1 км	Medium Frequencis	MF	Mittelwellen	Гектометровые	СЧ
3,0...30 МГц	100...10 м	High Frequencis	HF	Kurzwellen	Декаметровые	ВЧ
30...300 МГц	10...1,0 м	Very High Frequencis	VHF	Ultrakurzwellen	Метровые	ОВЧ
0,3...3,0 ГГц	100...10 см	Ultra High Frequencis	UHF	Dezimeterwellen	Дециметровые	УВЧ
3,0...30 ГГц	10...1,0 см	Super High Frequencis	SHF	Zentimeterwellen	Сантиметровые	СЧВ
30...300 ГГц	0,1...1 мм	Extremely High Frequencis	EHF	Millimeterwellen	Миллиметровые	КВЧ

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СВЧ ДИАПАЗОНА

Эффект 1: Наличие паразитных емкостей:

- между проводниками схемы
- между проводниками или компонентами и «землей»
- между компонентами или между элементами отдельными компонентами

Эффект 2: Наличие паразитных индуктивностей:

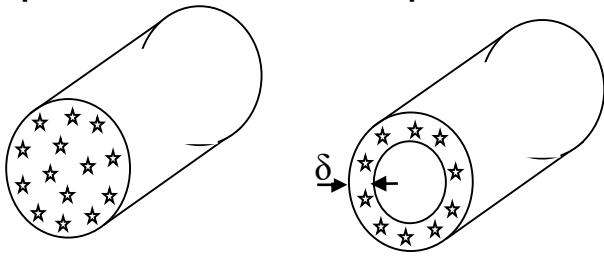
- индуктивность проводников, соединяющих компоненты
- индуктивность самих компонентов

Эффект 3: Излучение:

- связь между компонентами схемы
- связь между корпусом и элементами

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СВЧ ДИАПАЗОНА

Эффект 4: Скин-эффект: Зависимость от частоты толщины слоя проводящего материала, по которому протекают СВЧ токи



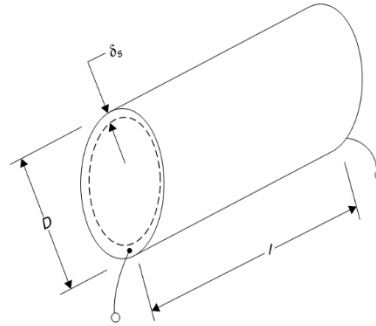
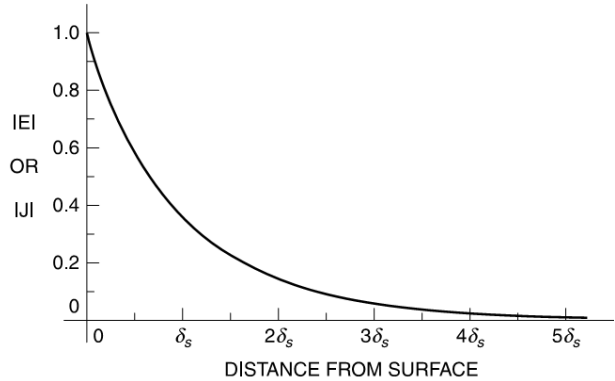
$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}$$

Для частоты 1 ГГц и серебра $\sigma = 6.17 \times 10^7 \text{ } \Omega/\text{m}$
глубина скин-слоя

$$\delta_s = \frac{1}{\sqrt{(3.14)(10^9 \text{ Hz})(4)(3.14)(10^{-7} \text{ H/m})(6.17)(10^7 \text{ } \Omega/\text{m})}}$$
$$= 2.03 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Когда толщина скин-слоя мала сопротивление проводника на переменном токе R_{AC} будет равна сопротивлению проводника на постоянном токе R_{DC} , толщина которого точно равна толщине скин-слоя.

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СВЧ ДИАПАЗОНА



$$R_{AC} = \frac{l}{\pi D \delta_s \sigma}$$

$$R_{DC} = \frac{l}{\pi (D^2/4) \sigma}$$

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = \frac{D}{4\delta_s}$$

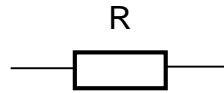
Для серебряного провода диаметром 0,25 мм это отношение на частоте 1 ГГц составит:

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = \frac{D}{4\delta_s} = \frac{(0.010 \text{ in.} \times 0.0254 \text{ m/in.})}{4(2 \times 10^{-6} \text{ m})} = 32$$

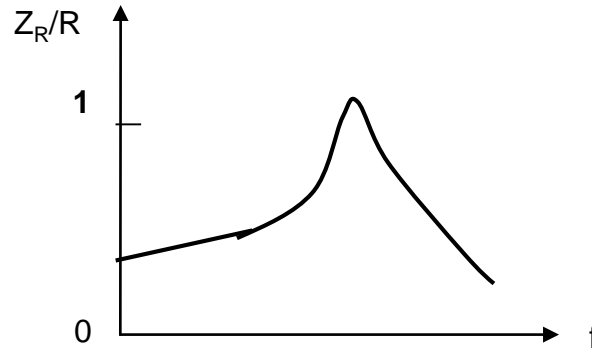
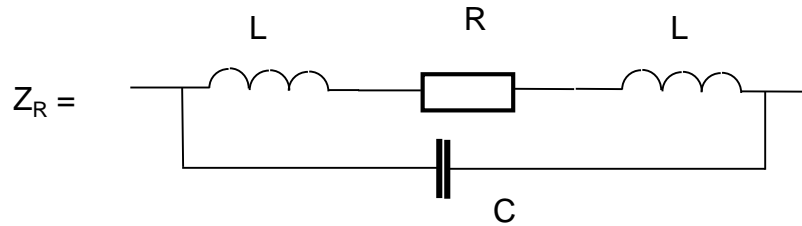
Сопротивление на переменном токе в 32 раза больше чем на постоянном!

РЕЗИСТОР

Идеальный резистор



Эквивалентная схема резистора на СВЧ



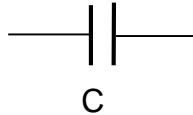
$$R = \rho l / S_{\text{эф}}$$

$$\uparrow f \Rightarrow \downarrow S_{\text{эф}} \Rightarrow \uparrow R$$

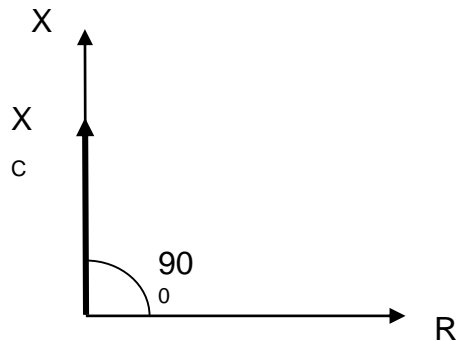
$$\uparrow f \Rightarrow \downarrow X_C \Rightarrow \downarrow Z_R$$

КОНДЕНСАТОР

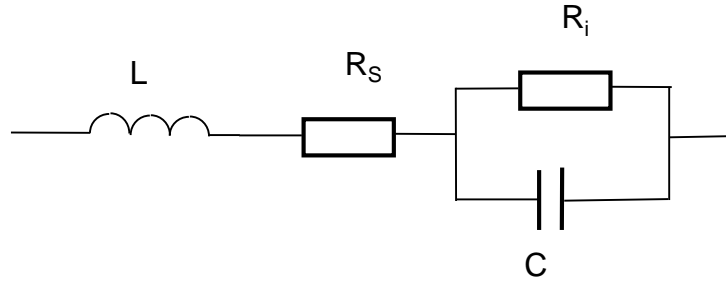
Идеальный конденсатор



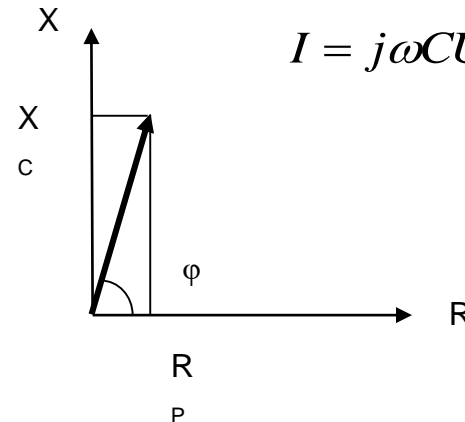
$$I = j\omega CU = \omega CU e^{j90}$$



Эквивалентная схема конденсатора на СВЧ



$$I = j\omega CU = \omega CU e^{j\varphi}$$



КОНДЕНСАТОР

Коэффициент мощности

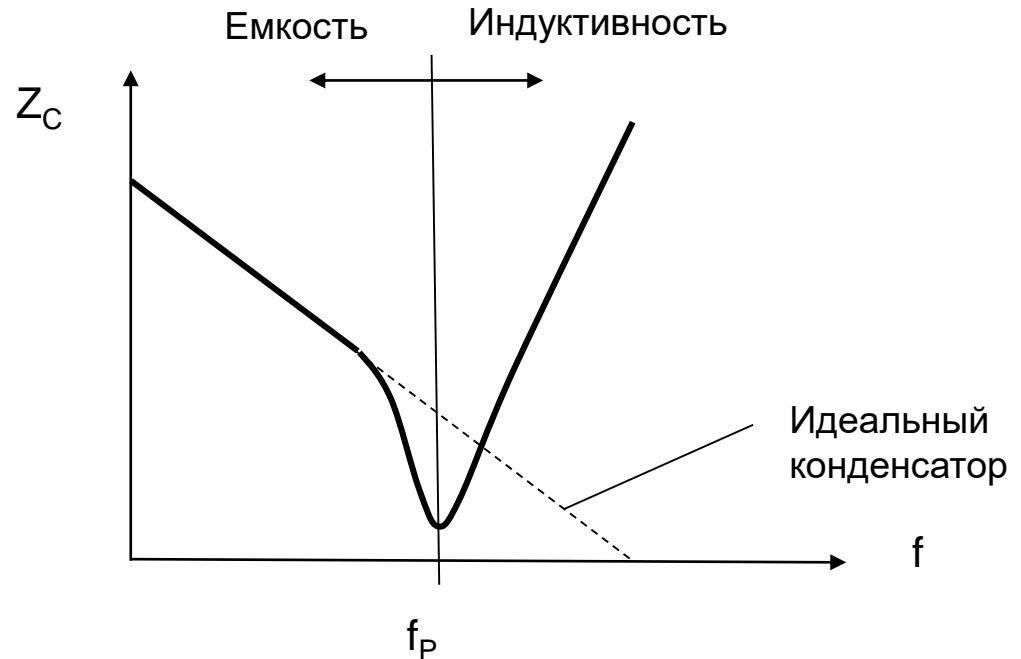
$$K_M = \cos \varphi = \frac{R_P}{\sqrt{X_C^2 + R_P^2}}$$

$$R_P \ll X_C \rightarrow K_M = \frac{R_P}{X_C}$$

Добротность конденсатора

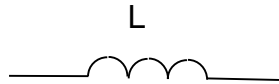
$$Q = \frac{X_C}{R_P} = \frac{1}{\omega C R_P}$$

$$R_P = 0 \rightarrow Q = \infty$$



ИНДУКТИВНОСТЬ

Идеальная индуктивность

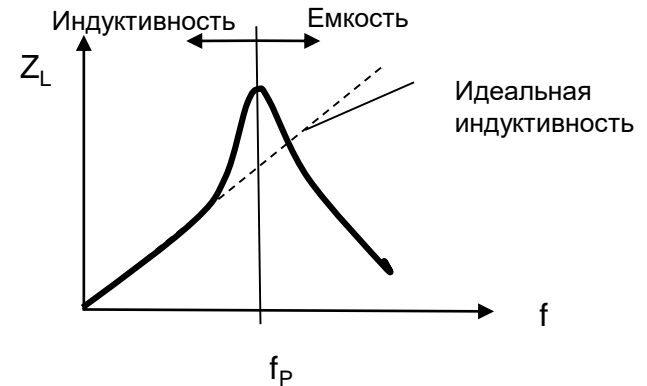
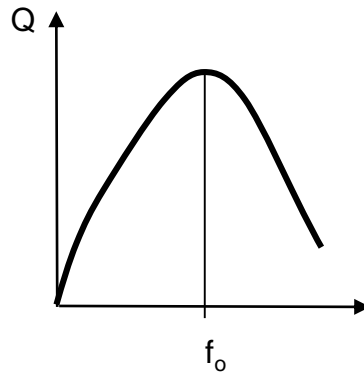
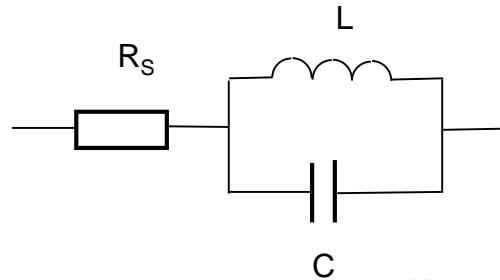


Добротность

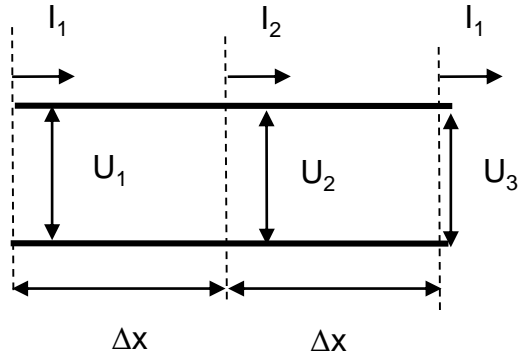
$$Q = \frac{X_L}{R_S} = \frac{\omega L}{R_S}$$

$$R_S = 0 \rightarrow Q = \infty$$

Эквивалентная схема индуктивности на СВЧ



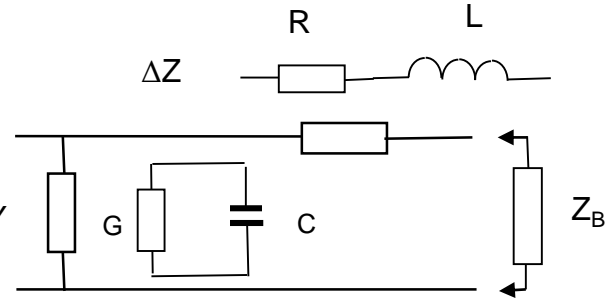
ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ. ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ



Однородная линия передачи

$$\frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2}{I_2} = \dots = \frac{U_k}{I_k} = Z_B \quad Z_B = \sqrt{\frac{\Delta Z}{\Delta Y}}$$

$$Z_{\text{ex}} = Z_B = \frac{(Z_B + \Delta Z) \frac{1}{\Delta Y}}{Z_B + \Delta Z + \frac{1}{\Delta Y}} \approx \frac{Z_B + \Delta Z}{1 + Z_B \Delta Y}$$

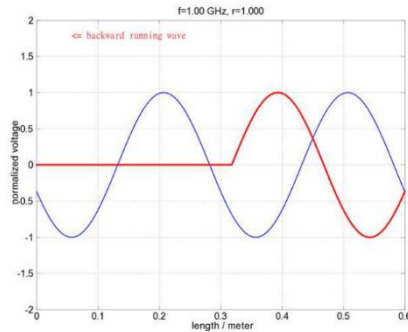


Эквивалентная схема линии передачи

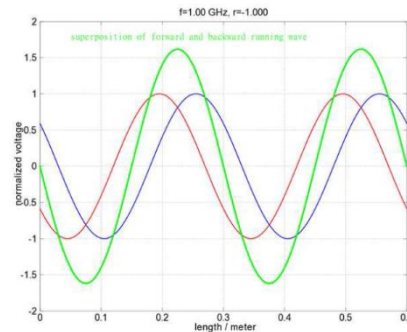
$$\Delta Z = R + j\omega L \quad \Delta Y = G + j\omega C \quad Ha - HЧ \rightarrow \sqrt{\frac{R}{G}}$$

$$Z_B = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad Ha - CBЧ \rightarrow \sqrt{\frac{L}{C}}$$

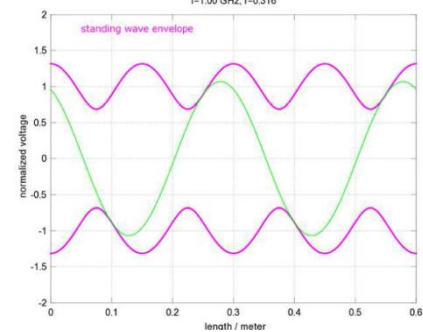
РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН



$$Z_L = \infty \Rightarrow \Gamma = 1$$



$$Z_L = 0 \Rightarrow \Gamma = -1$$

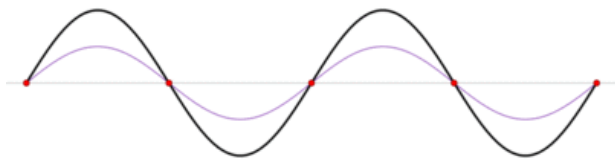


$$Z_L = Z_0 \Rightarrow \Gamma = 0$$

$$\Gamma = \frac{\frac{Z_L}{Z_0} - 1}{\frac{Z_L}{Z_0} + 1} = \frac{U^-}{U^+} = \frac{\text{Отраженная волна}}{\text{Падающая волна}}$$

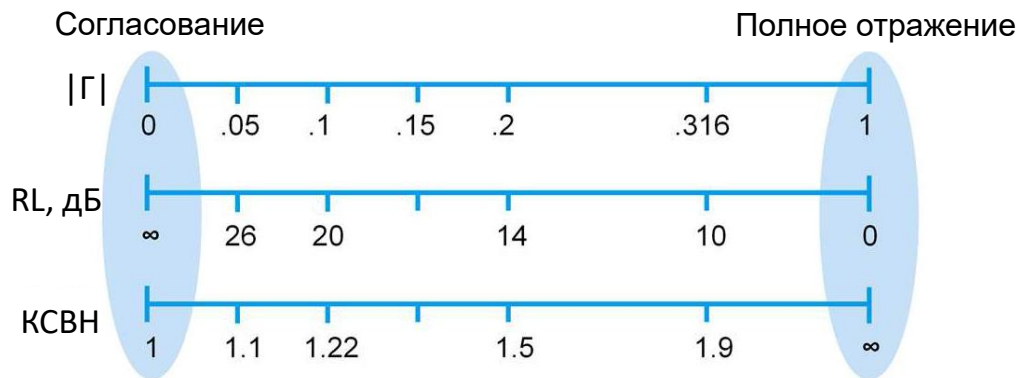
Z_L в общем случае – комплексная величина
 Γ – коэффициент отражения

СВЯЗЬ МЕЖДУ КСВН, КОЭФФИЦИЕНТОМ ОТРАЖЕНИЯ И ОБРАТНЫМИ ПОТЕРЯМИ (RL)

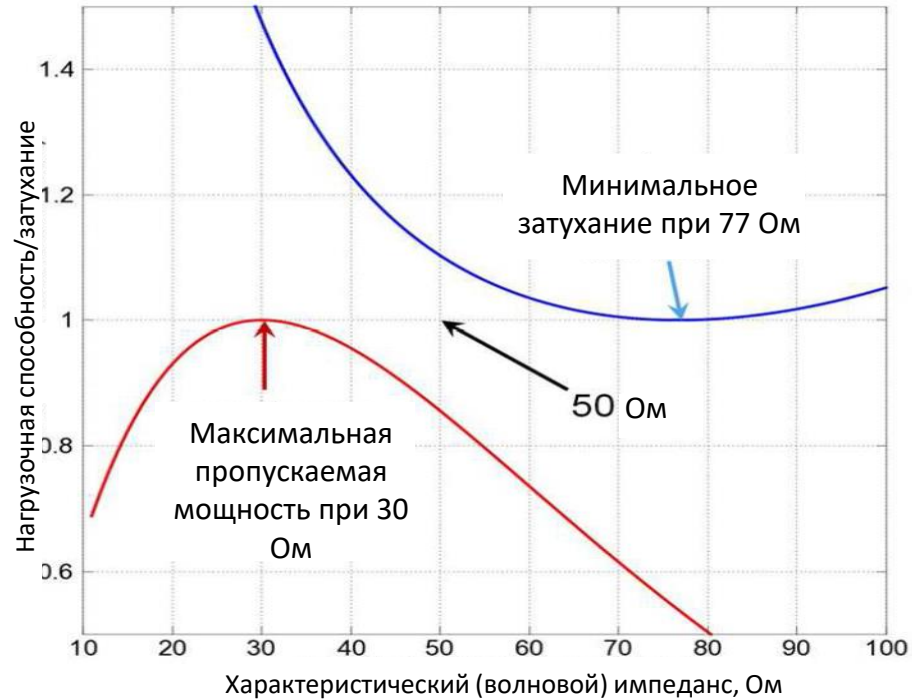


$$|\Gamma| = 10^{\frac{-RL}{20}}; \quad RL = -20 \cdot \lg|\Gamma|$$

$$КСВН = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}; \quad |\Gamma| = \frac{КСВН - 1}{КСВН + 1}$$



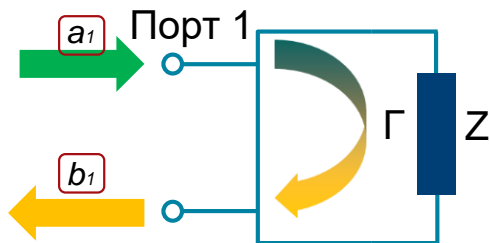
ВЫБОР ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ



ВОЛНОВЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И S-ПАРАМЕТРЫ ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА

$$\Gamma = \frac{b}{a}$$

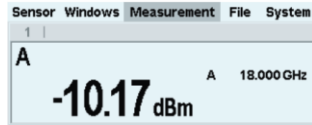
Коэффициент
отражения



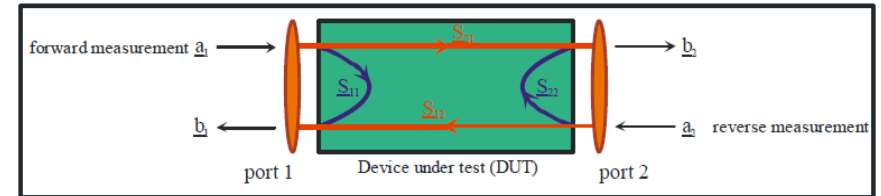
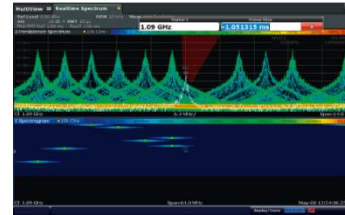
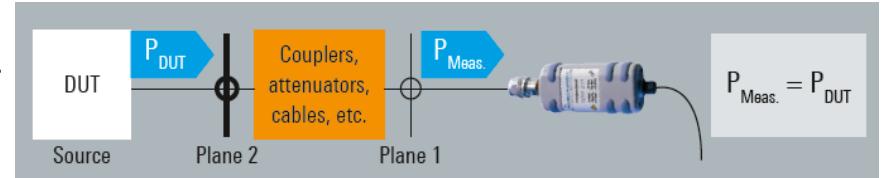
Двух-портовое устройство с волновыми величинами и параметрами рассеяния
S – от слова Scattering (Рассеивание)
Принятое обозначение: S <куда><откуда>

ДЛЯ ЧЕГО НЕОБХОДИМ ВАЦ

- Измерение мощности – это широкополосные измерения полной мощности в полосе частот



- Измерение спектра сигнала – частотно-селективные измерения мощности в полосе частот
- Измерение электрической цепи – сравнение напряжения и/или фазы синусоидального сигнала на входе и выходе исследуемого устройства



ДЛЯ ЧЕГО НЕОБХОДИМ ВАЦ

Пассивные компоненты



антенна



фильтры



аттенюаторы

Активные компоненты

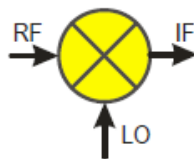


усилители

Устройства с преобразованием частоты

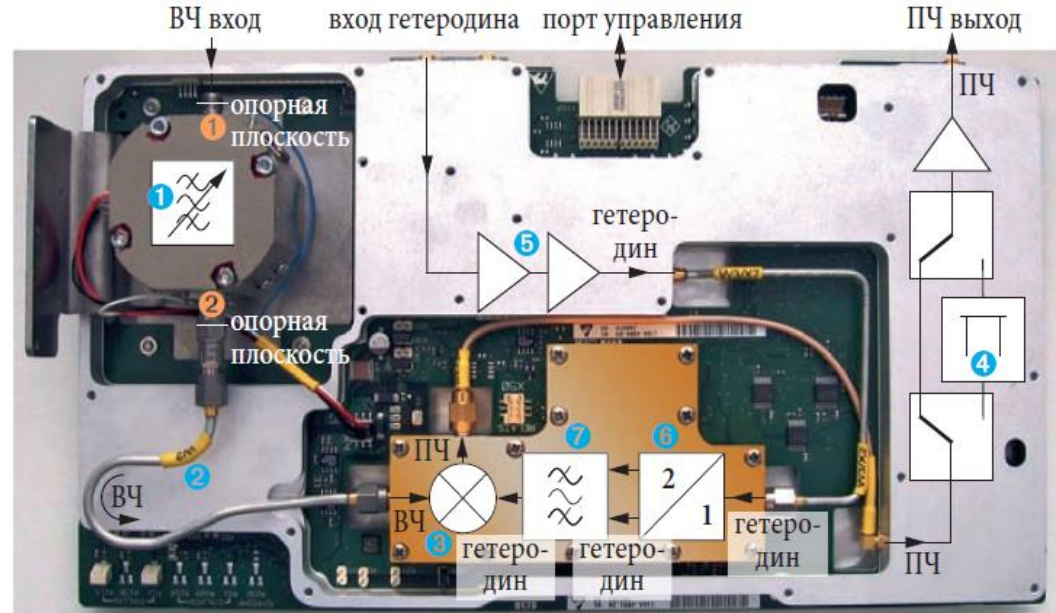


смесители

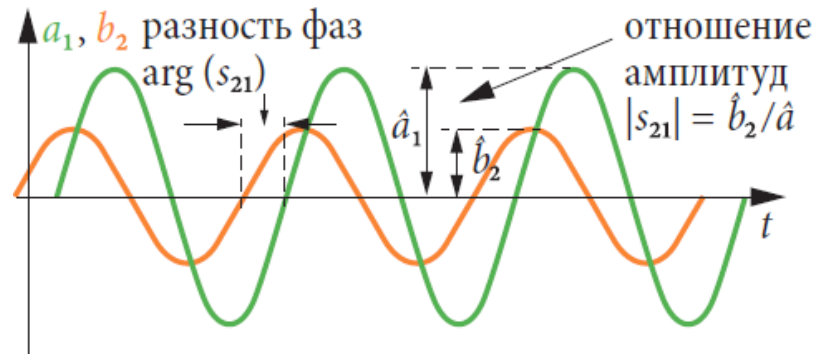


ДЛЯ ЧЕГО НЕОБХОДИМ ВАЦ

1. Фильтр СВЧ
2. Полужёсткий кабель
3. Смеситель
4. Переключаемый аттенюатор
5. Каскад усилителей
6. Умножитель частоты
7. Полосно-пропускающий фильтр



ДЛЯ ЧЕГО НЕОБХОДИМ ВАЦ СКАЛЯРНЫЙ VS ВЕКТОРНЫЙ АНАЛИЗАТОР



Скалярный анализатор цепей:

- Измерения только разницы в амплитудах между волновыми величинами

Векторный анализатор цепей:

- Помимо измерения амплитудных характеристик возможны измерения фазовых
- Может выполнять полную коррекцию систематических ошибок
- Измерения во временной области
- Удаление и внедрение виртуальных цепей

ROHDE & SCHWARZ – ВЕКТОРНЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ ЦЕПЕЙ

производительность



Носимые и бюджетные

Многопортовые решения

Для разработки и отладки

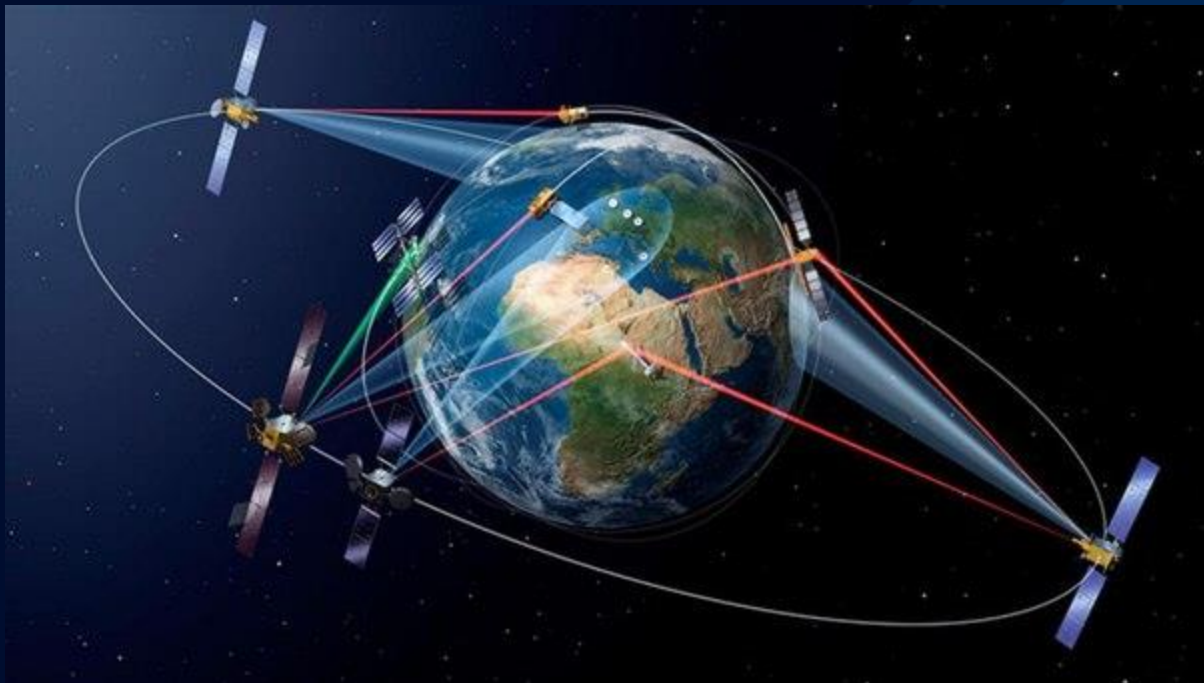
Решение большинства задач

цена

ПРИМЕР: ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛОСЫ ФИЛЬТРА



ГЕНЕРАТОРЫ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ



GPS, ГЛОНАСС, BEIDOU, GALILEO

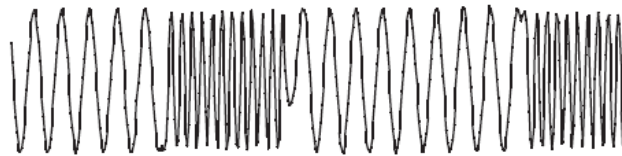
МЕТОДЫ И ВИДЫ МОДУЛЯЦИИ

В аналоговой модуляции модулирующий сигнал является аналоговым. Он может изменять одну из трех переменных сигнала несущей: амплитуду, частоту или фазу.

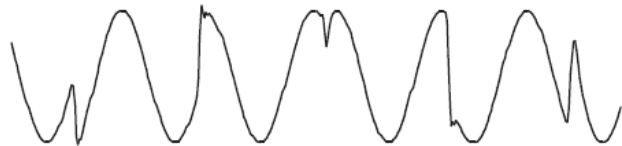
Амплитудная



Частотная



Фазовая



НЕДОСТАТКИ АНАЛОГОВОЙ МОДУЛЯЦИИ

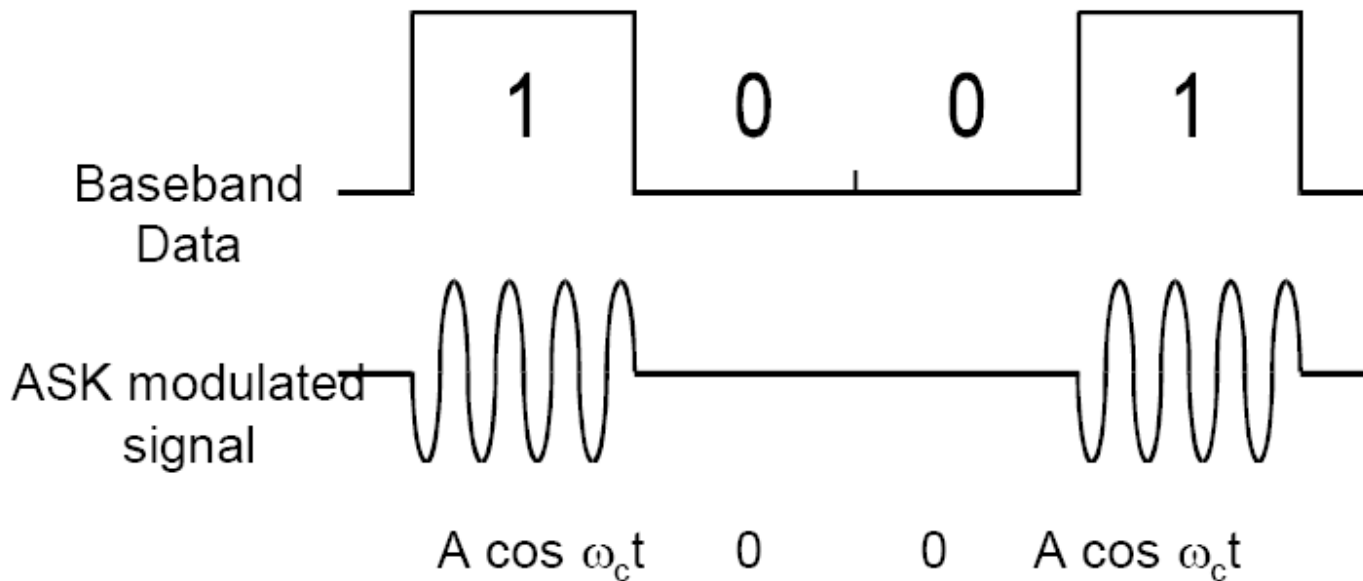
1. Низкая эффективность использования полосы частот.
2. Невысокая информационная емкость каналов связи.
3. Низкая помехозащищенность.
4. Невысокая эффективность по мощности. Способность системы к надежной передаче информации при ограниченных уровнях передаваемой мощности.
5. Сложность сочленения с современными цифровыми устройствами обработки и отображения полезной информации.
6. Невозможность применения современных методов кодировки сигнала.

ВИДЫ ЦИФРОВОЙ МОДУЛЯЦИИ

В цифровой модуляции модулирующий сигнал передается последовательностью битов. Бит является единицей информации, представляющий собой двоичный разряд, т.е. 1 или 0. Биты могут передаваться с различной скоростью, называемой скоростью передачи битов (bit rate). Возьмем, например, радио систему с 8-битной схемой дискретизации, осуществляющей стробирование на частоте 10 кГц. В этом случае скорость передачи битов составит 80 Кбит/с. Определенная последовательность битов представляет собой символ. Символьная скорость будет равна скорости передачи битов, деленной на число битов передаваемых в каждом символе. Если символ состоит из 2 битов, то символьная скорость будет равна в нашем примере 40 Кбит/с. Число состояний в символе определяется по формуле: $M=2^k$, где k – число битов в символе. Скорость передачи битов часто называют скоростью передачи данных: $R = k/T = \log_2 M/T$ (бит/с), где: T – длительность k – битового символа.

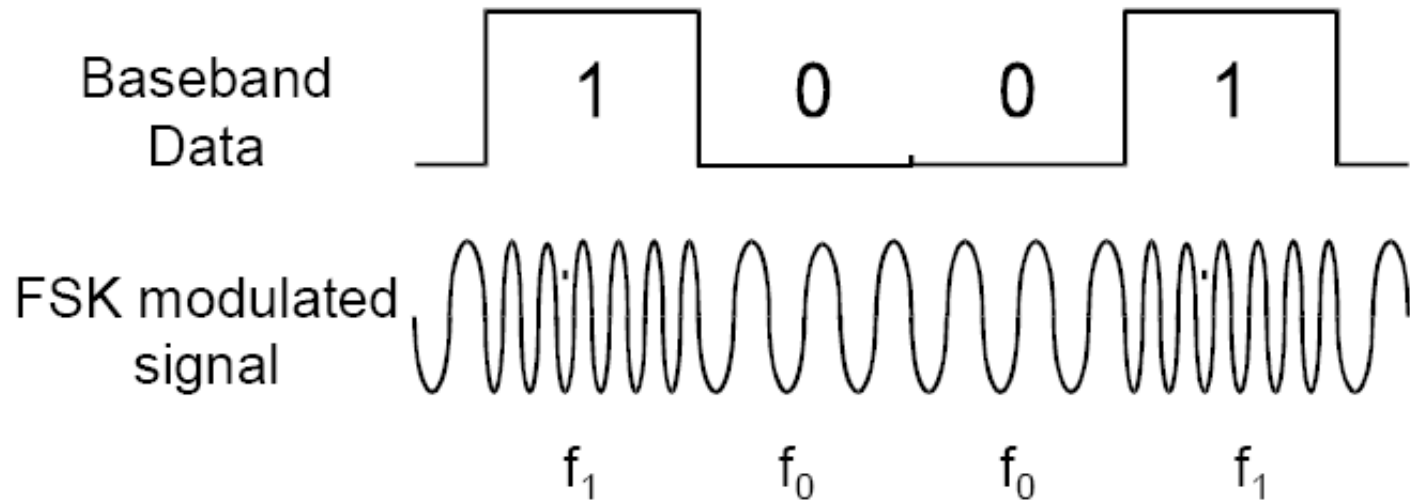
АМПЛИТУДНАЯ, ЧАСТОТНАЯ И ФАЗОВАЯ МАНИПУЛЯЦИИ (ASK, FSK, PSK)

Amplitude Shift Keying (ASK)



АМПЛИТУДНАЯ, ЧАСТОТНАЯ И ФАЗОВАЯ МАНИПУЛЯЦИИ

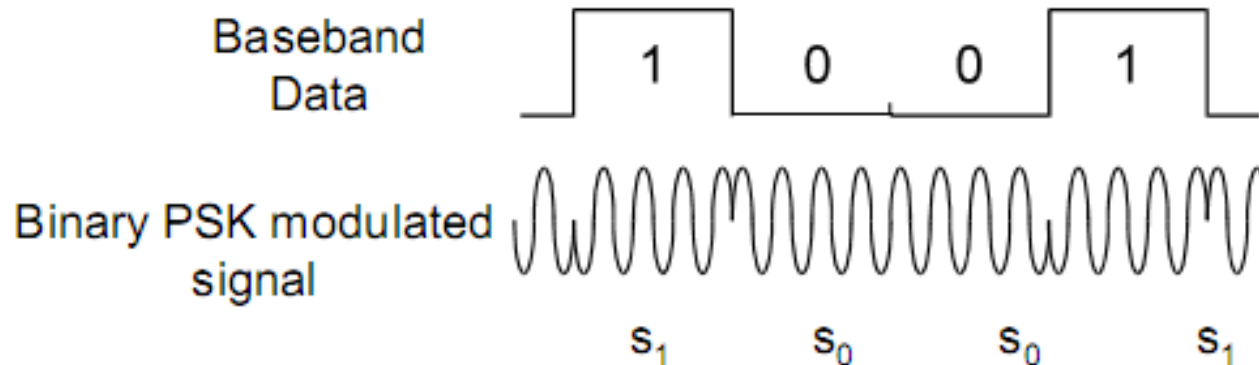
Frequency Shift Keying (FSK)



where $f_0 = A \cos(\omega_c - \Delta\omega)t$ and $f_1 = A \cos(\omega_c + \Delta\omega)t$

АМПЛИТУДНАЯ, ЧАСТОТНАЯ И ФАЗОВАЯ МАНИПУЛЯЦИИ (ASK, FSK, PSK)

Phase Shift Keying (PSK)

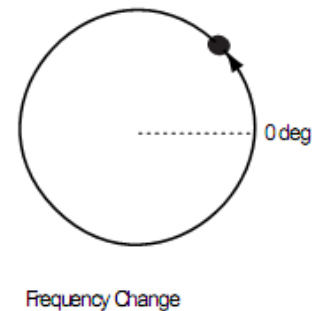
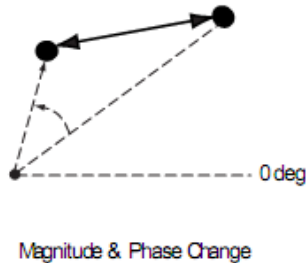
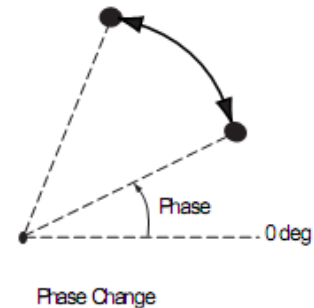
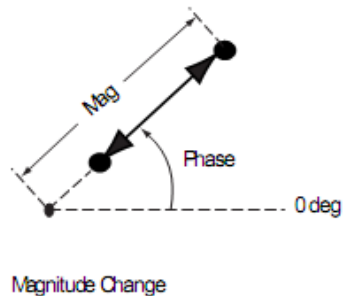
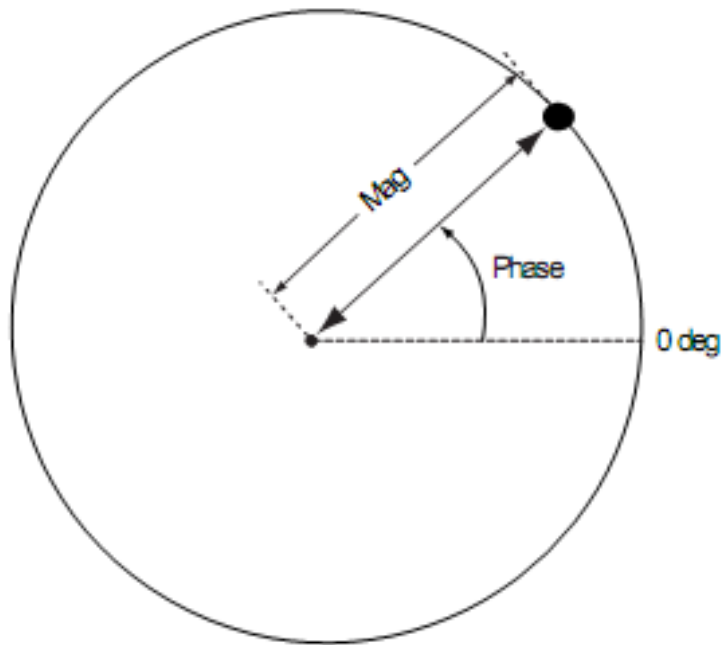


where $s_0 = -A \cos \omega_c t$ and $s_1 = A \cos \omega_c t$

КВАДРАТУРНЫЕ ТИПЫ МОДУЛЯЦИИ

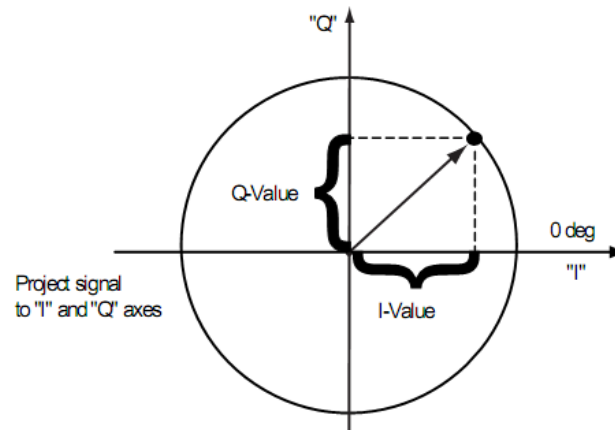
СПОСОБЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА

► Представление сигнала в полярной диаграмме:



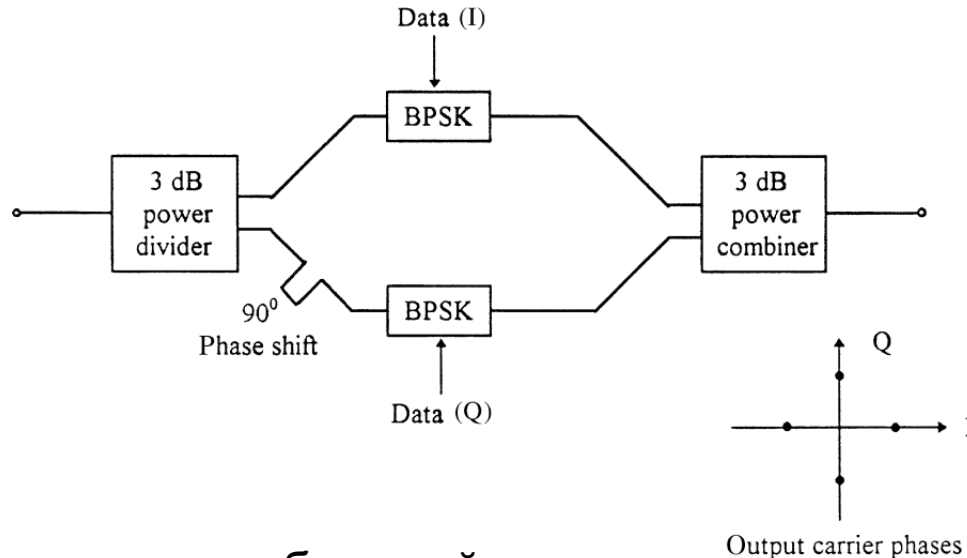
ПРЯМОУГОЛЬНЫЕ I/Q КООРДИНАТЫ

Представление модулированных сигналов в I/Q формате является преобразованием полярной диаграммы к прямоугольному виду. Ось I (In-phase) лежит на нулевом отсчете фазового угла. Ось Q (Quadrature) повернута на 90^0 . Проекция сигнального вектора на ось I есть "I" компонента, а проекция на ось Q – "Q" компонента.



Polar to Rectangular Conversion

КВАДРАТУРНАЯ ФАЗОВАЯ МАНИПУЛЯЦИЯ (QPSK)



QPSK обладает в два раза большей скоростью передачи данных, так как одновременно передаются два потока данных. Эффективность полосы пропускания 2 bps/Hz вместо 1 bps/Hz для BPSK. QPSK передает 4 (2^2) фазовых состояния: 0° , 180° и 90° , 270° .

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ QPSK

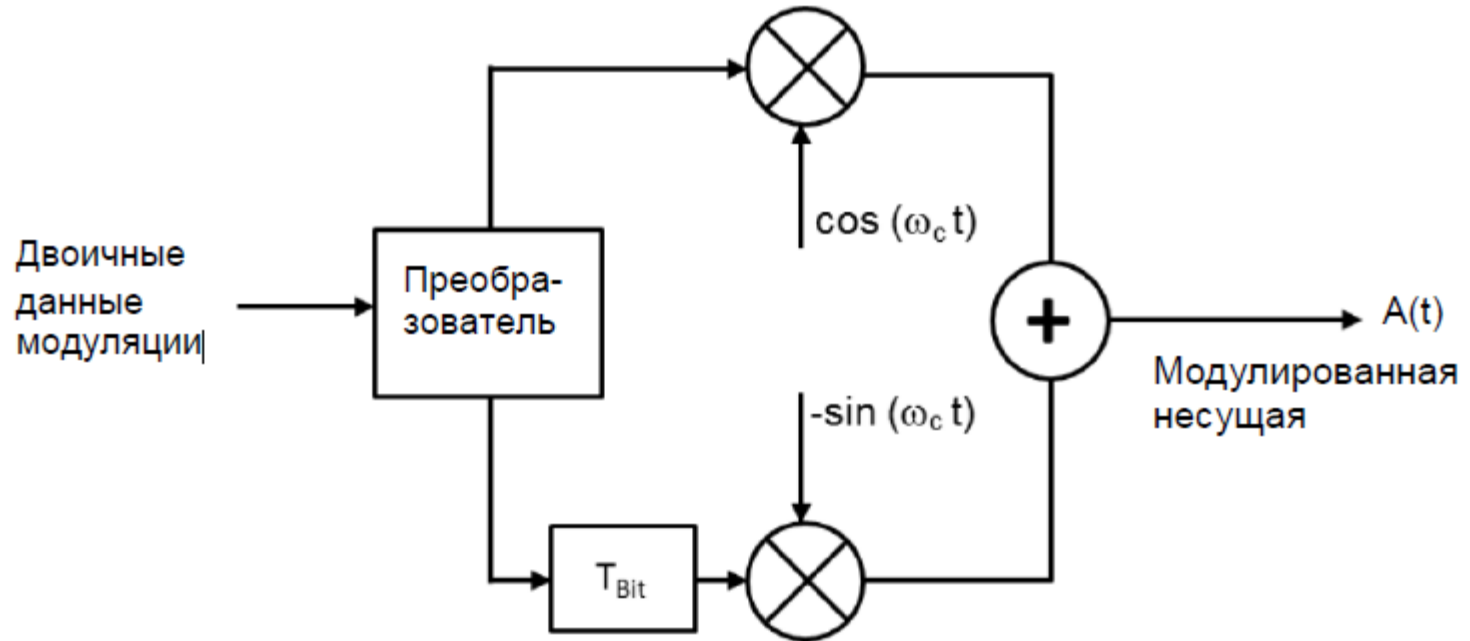
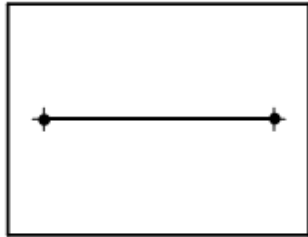
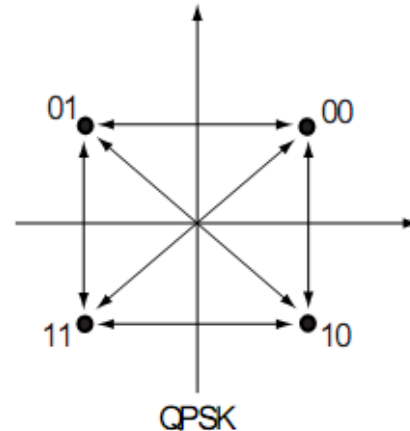


ДИАГРАММА СОЗВЕЗДИЙ

Диаграмма созвездий представляет собой возможные состояния модулированного сигнала в виде точек на комплексной I/Q плоскости. Эти состояния по сути являются передаваемыми символами для данного вида модуляции.

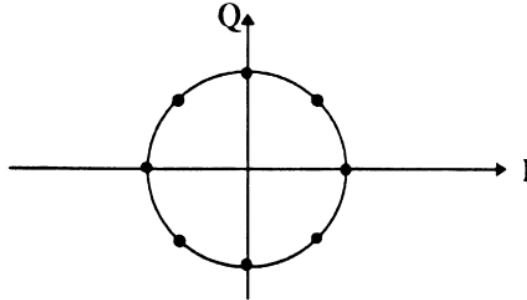


BPSK
One Bit Per Symbol
Symbol Rate = Bit Rate

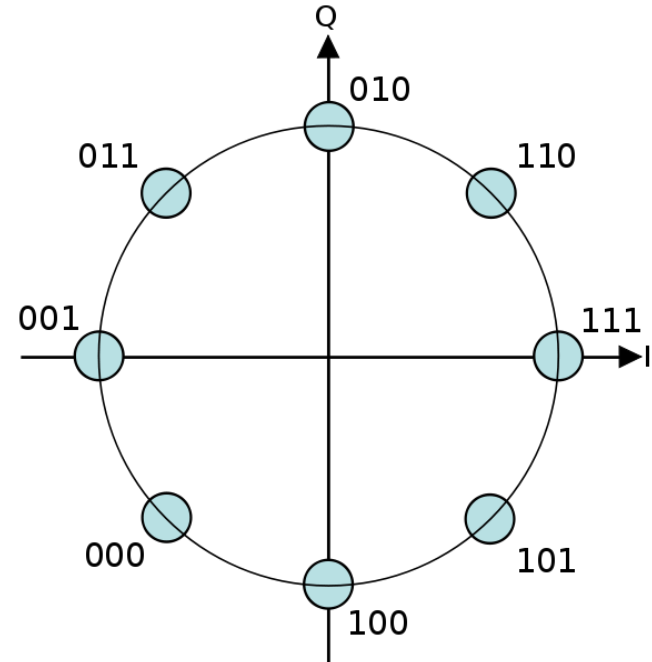
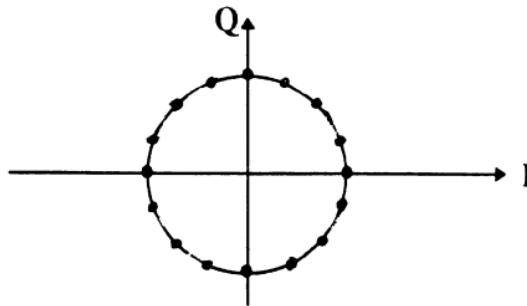


М-АРНЫЕ ВИДЫ МОДУЛЯЦИИ

8 - PSK
equal amplitude
phase separation = 45°



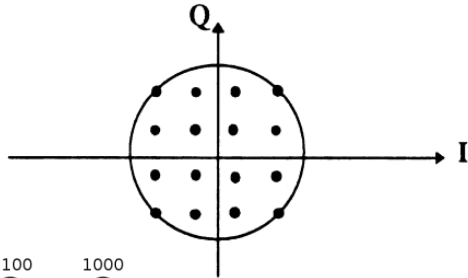
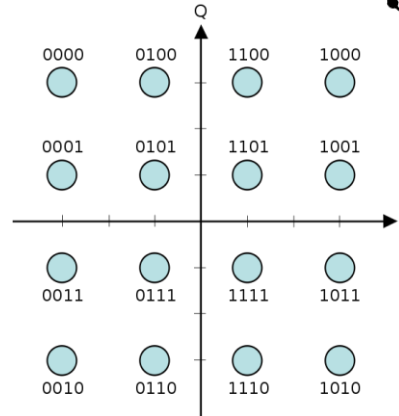
16 - PSK
equal amplitude
phase separation = 22.5°



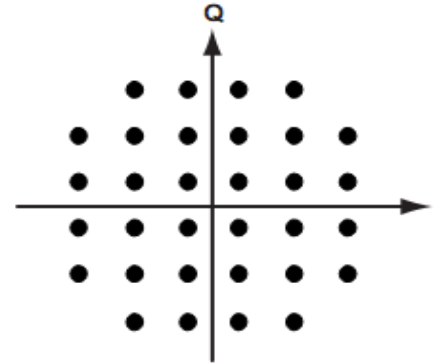
КВАДРАТУРНАЯ АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ (QAM)

В QAM меняется как амплитуда, так и фаза сигнала, за счет чего увеличивается пропускная способность канала связи.

16-QAM
unequal amplitude
and phase separation

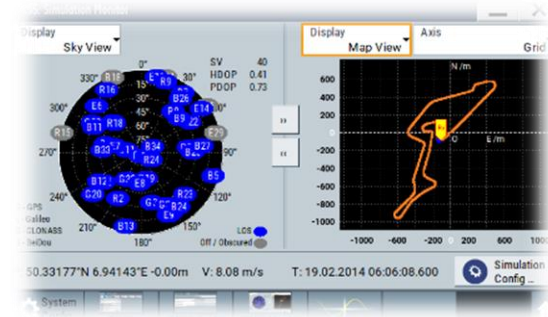


Constellation Diagram



32QAM
Five Bits Per Symbol
Symbol Rate = 1/5 Bit Rate

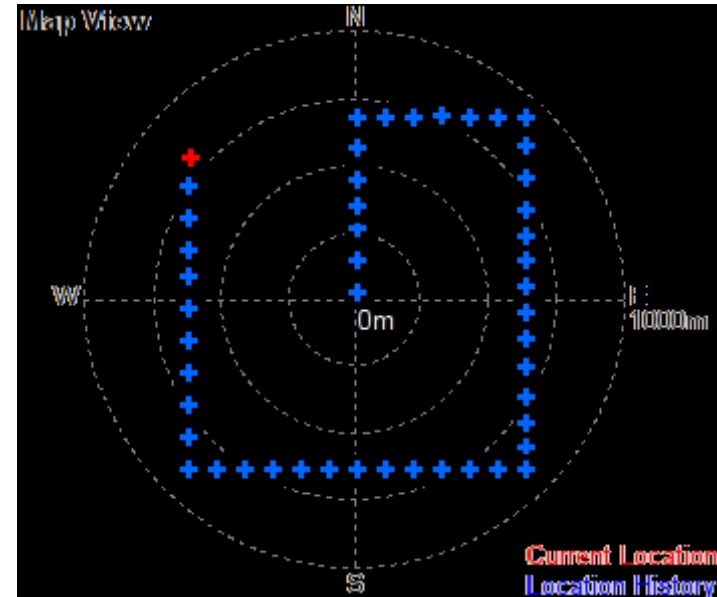
СОВРЕМЕННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ГНСС



- GPS
- ГЛОНАСС
- BEIDOU
- GALILEO

ДИНАМИЧЕСКИЕ СЦЕНАРИИ

- ▶ Динамический сценарий имитирует сигналы приемников по траектории, определенной пользователем.
- ▶ Определение параметров движения объекта
- ▶ Продолжительность движения по маршруту может достигать 4 дней



ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СИГНАЛ В РЕАЛЬНОЙ СРЕДЕ

ИСТОЧНИКИ УХУДШЕНИЯ СИГНАЛА

Оборудование:

- Искажения сигнала
- Сбои синхронизации

Влияние ионосферы:

- Задержка распространения
- Мерцания

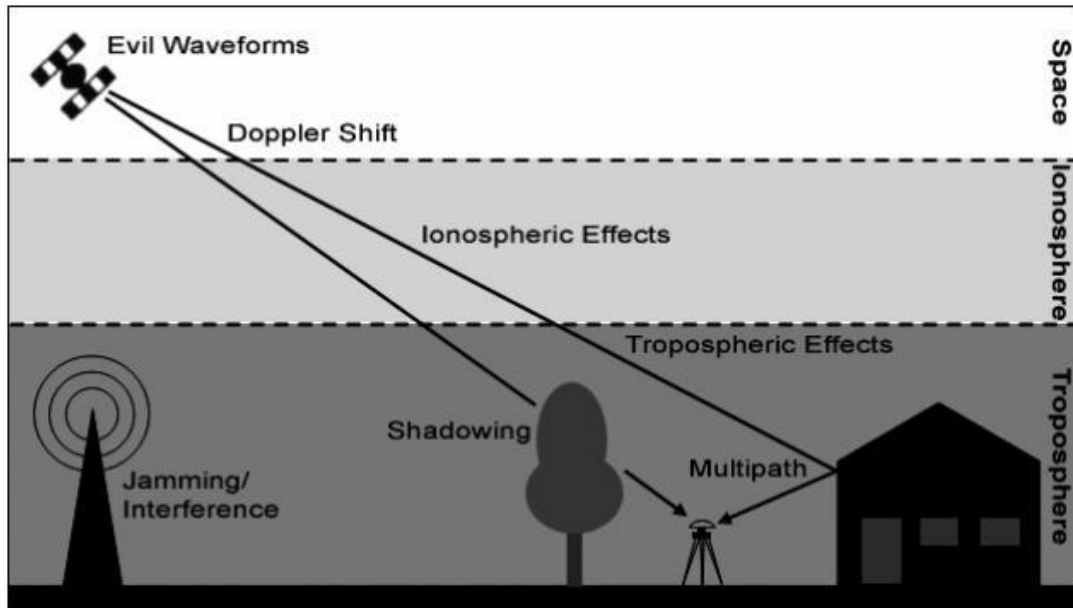
Влияния тропосферы:

- Задержка распространения

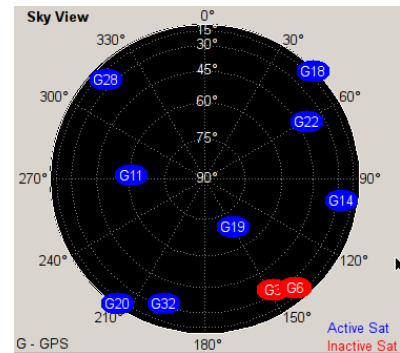
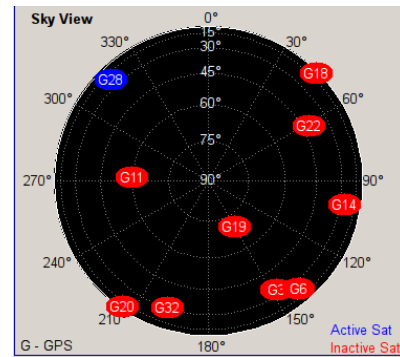
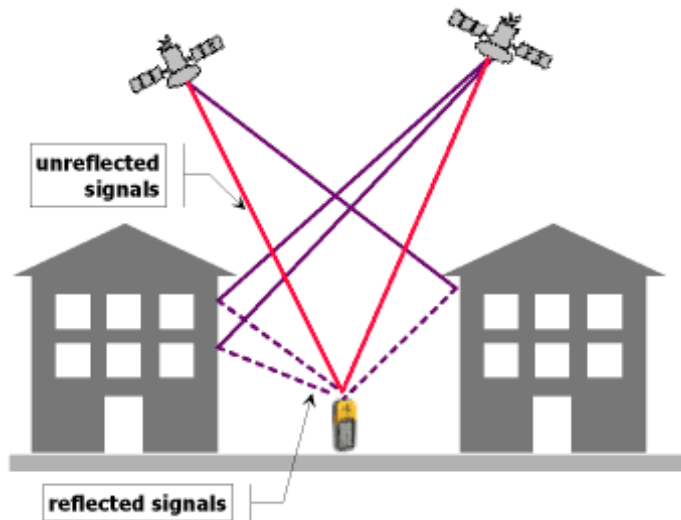
Окружающая среда:

- Многолучевой сигнал
- Препятствия
- Характеристики антенны
- Затенение/помехи

Данные эффекты возможно имитировать

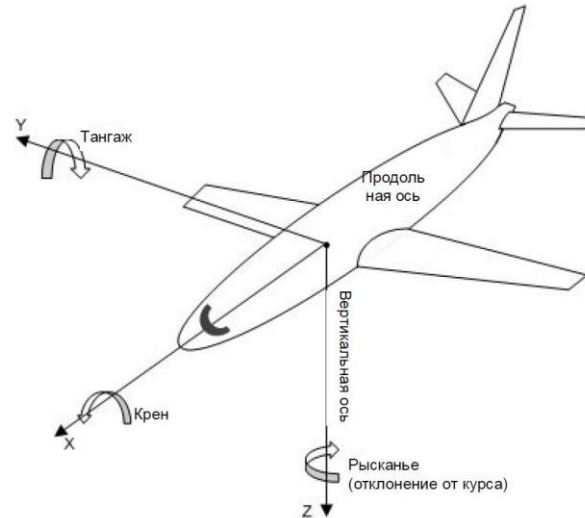


ИСПЫТАНИЯ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ С УЧЕТОМ МНОГОЛУЧЕВЫХ СИГНАЛОВ



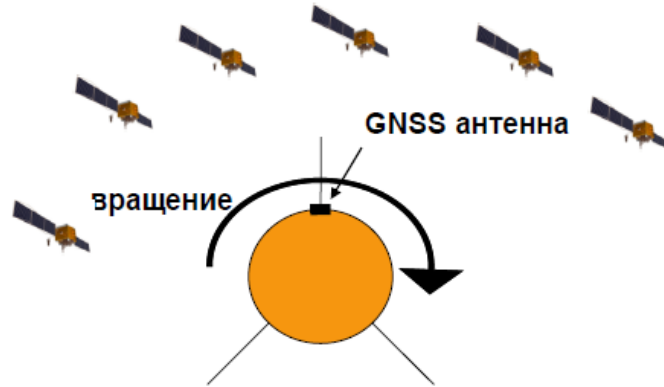
ИМИТАЦИЯ ВРАЩЕНИЯ И УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ

Положение антенны



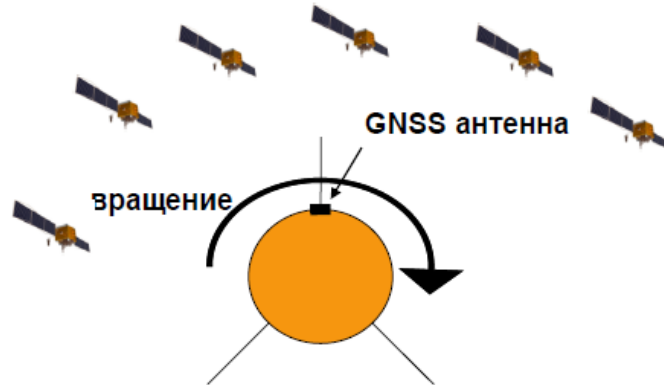
ВРАЩЕНИЕ

- ▶ Современные высокотехнологичные реактивные снаряды используют GNSS для определения цели.
- ▶ GPS антенна располагается на внешней поверхности ракеты
- ▶ Для стабилизации полета происходит вращение ракеты



ВРАЩЕНИЕ

- ▶ Из-за вращения ракеты сигнал от спутника доступен для приемника в течение короткого периода времени
- ▶ Обычно ракеты имеют 3 или 4 антенны для постоянного получения информации о местоположении



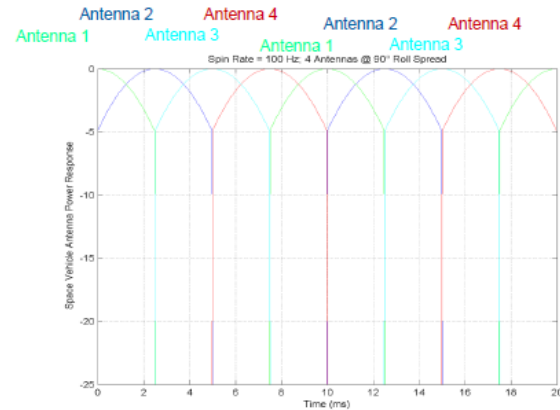
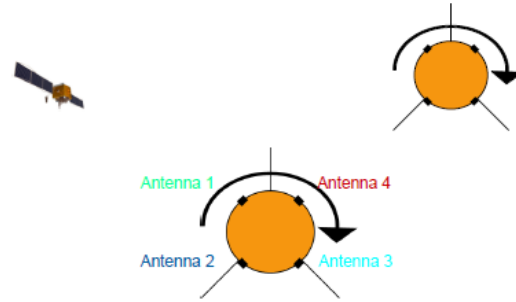
ВРАЩЕНИЕ

Пример: 4 антенны, 1 спутник

Графики показывают сигнал, принимаемый различными антеннами в момент вращения ракеты.

Эффект вращения зависит от положения спутника и расположения антенн

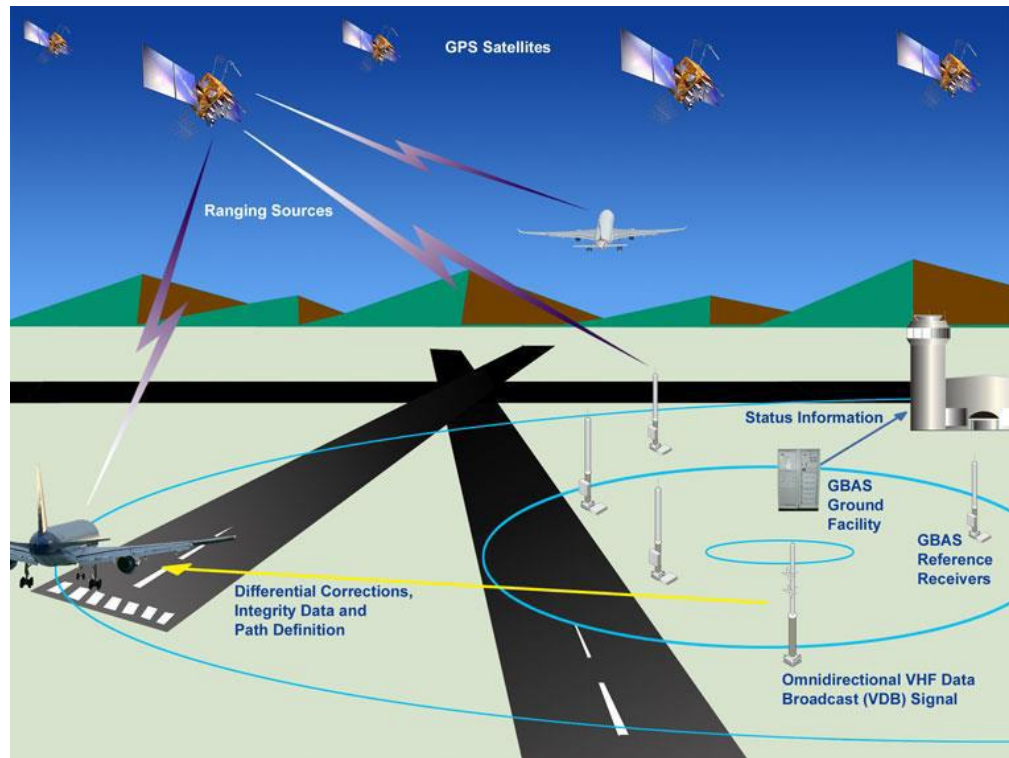
Необходимо определять параметры для каждого спутника в отдельности



GBAS

НАЗЕМНАЯ СИСТЕМА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДОПОЛНЕНИЯ

- ▶ Предназначена для использования в системах посадки самолетов, независящих от погодных условий, совместно с наземным оборудованием системы GNSS
- ▶ Используется для повышения точности и полноты информации о позиционировании



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

ROHDE & SCHWARZ

Make ideas real

