

Тема 1. Классификация СВЧ элементной базы

- Области применения СВЧ электроники
- Особенности распространения радиоволн различных частотных диапазонов
- Анализ современного состояния развития СВЧ элементной базы
- Общие проблемы генерации и усиления СВЧ
- Тенденции развития СВЧ электроники

Частотные диапазоны электромагнитного излучения

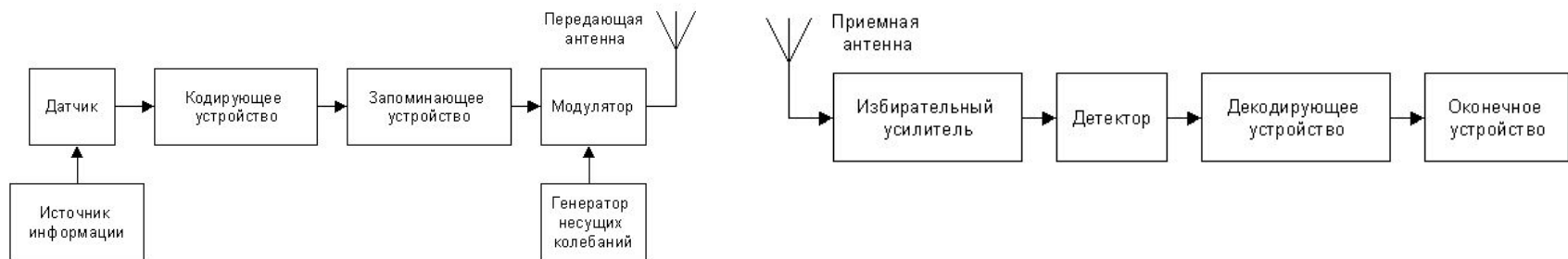


Частотные поддиапазоны СВЧ диапазона

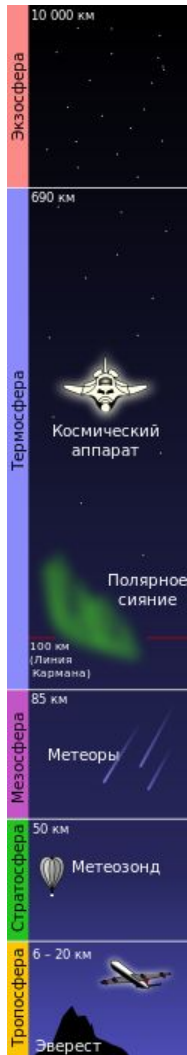
Диапазоны частот		
Название	Частотный диапазон, ГГц	
Название диапазона	Диапазон частот РЛС	Диапазон частот в спутниковой связи
L		1,0 — 2,0
S		2,0 — 4,0
C	4,0 — 8,0	4,0 — 7,0
X	8,0 — 12,0	7,0 — 10,7
Ku	12,0 — 18,0	10,7 — 18,0
K	18,0 — 26,5	18,3 — 20,2; 27,5 — 31,5
Ka	26,5 — 40,0	

Номер диапазона	Диапазон частот*	Диапазоны длин волн**	Соответствующее метрическое подразделение
5	30—300 КГц	10^4 — 10^3 м	Километровые волны (низкие частоты — НЧ)
6	300—3000 КГц	10^3 — 10^2 м	Гектометровые волны (средние частоты — СЧ)
7	3—30 МГц	10^2 —10 м	Декаметровые волны (высокие частоты — ВЧ)
8	30—300 МГц	10—1 м	Метровые волны (очень высокие частоты — ОВЧ)
9	300—3000 МГц	1—0,1 м	Дециметровые волны (ультра-высокие частоты — УВЧ)
10	3—30 ГГц	10—1 см	Сантиметровые волны (сверх-высокие частоты — СВЧ)
11	30—300 ГГц	1—0,1 см	Миллиметровые волны (крайне высокие частоты — КВЧ)

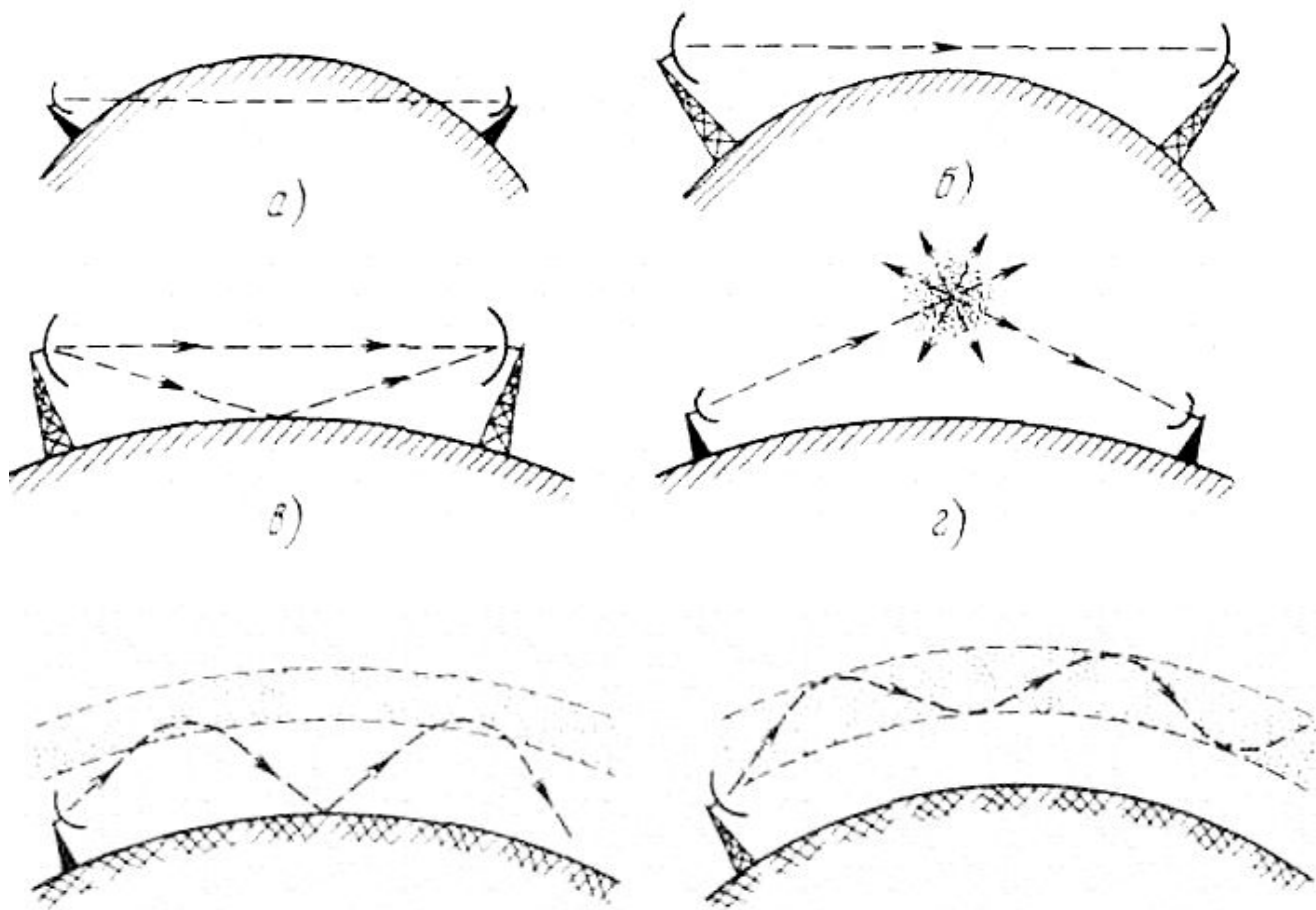
Структурная схема канала связи



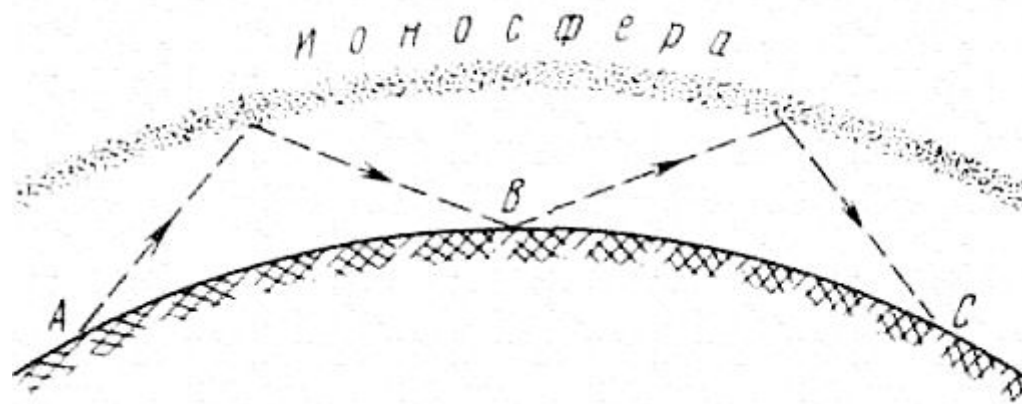
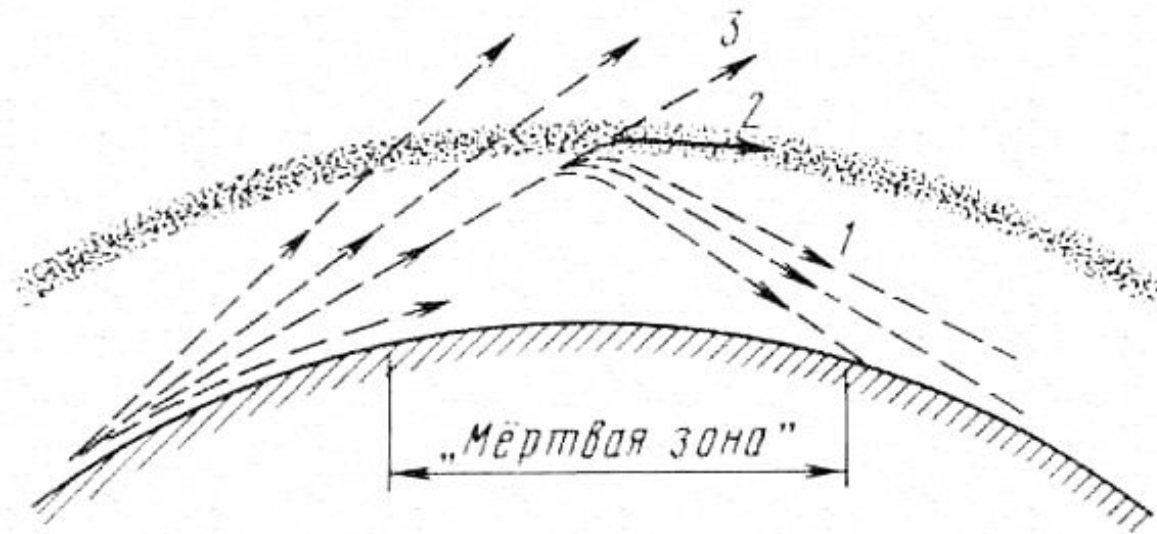
Строение атмосферы Земли



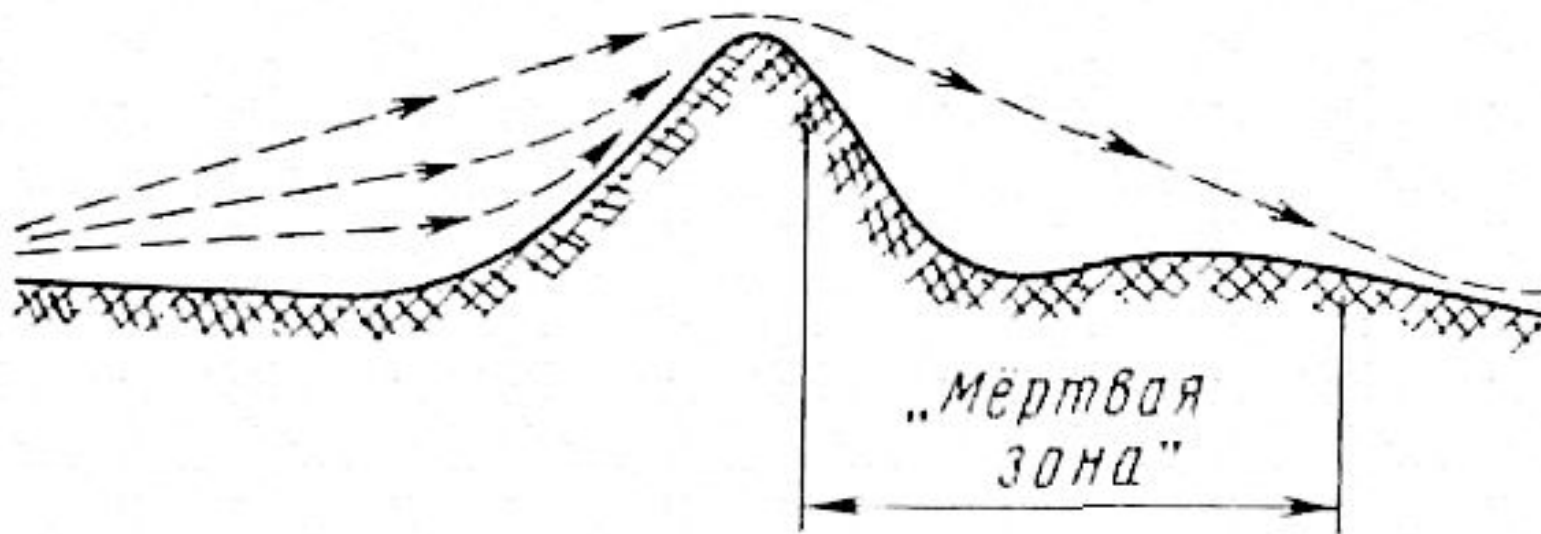
Распространение радиоволн диапазонов ОВЧ, УВЧ и СВЧ



Распространение волн диапазона ВЧ



Распространение радиоволн диапазонов СЧ, НЧ, ОНЧ

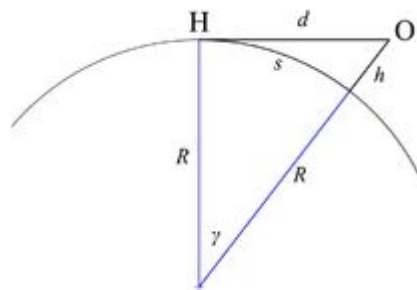


Оценка дальности распространения радиоволн.

Расстояние до видимого горизонта

В случае, если видимый горизонт определять как границу между небом и Землёй, то рассчитать геометрическую дальность видимого горизонта можно, воспользовавшись теоремой Пифагора

$$d = \sqrt{(R + h)^2 - R^2}$$

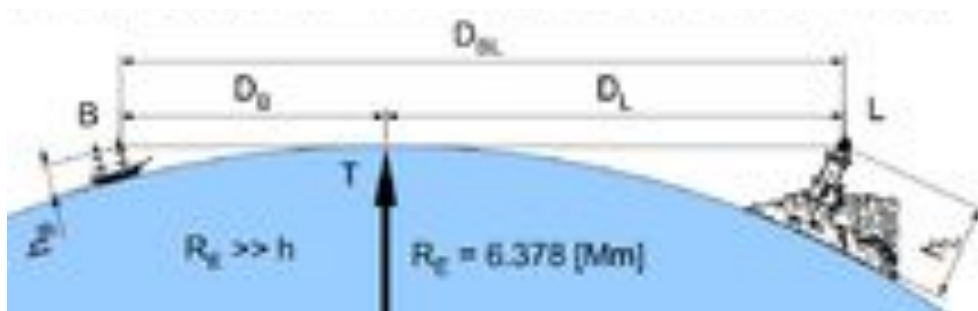


Здесь d — геометрическая дальность видимого горизонта, R — радиус Земли, h — высота точки наблюдения относительно поверхности Земли

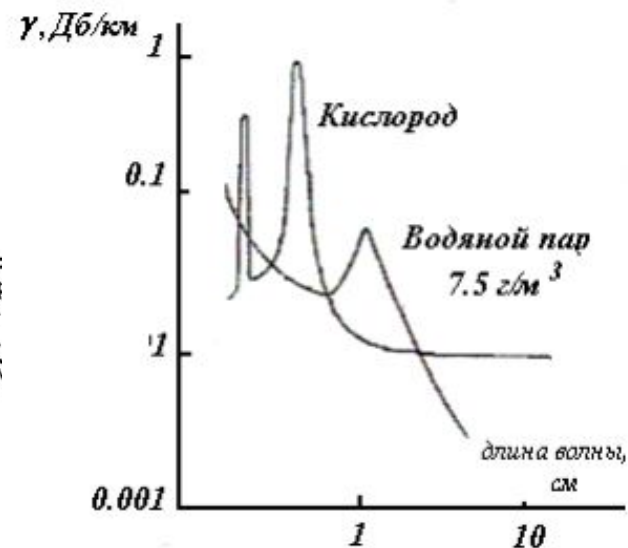
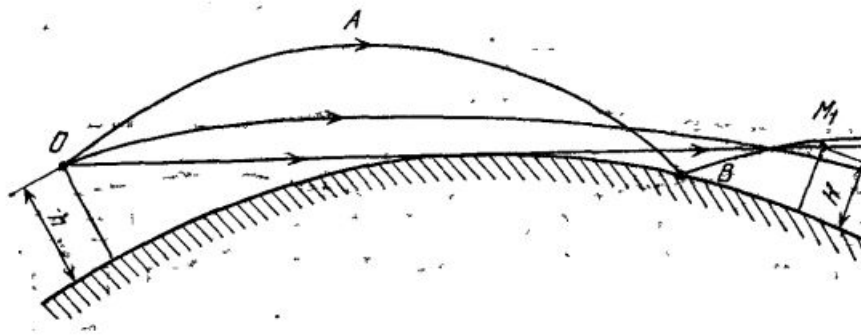
$$d = 113\sqrt{h},$$

Оценка дальности распространения радиоволн.

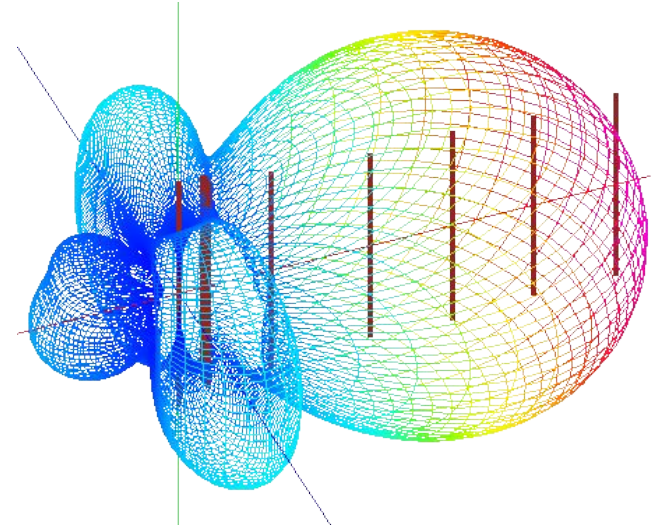
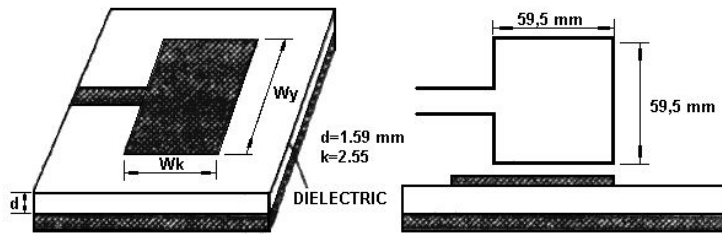
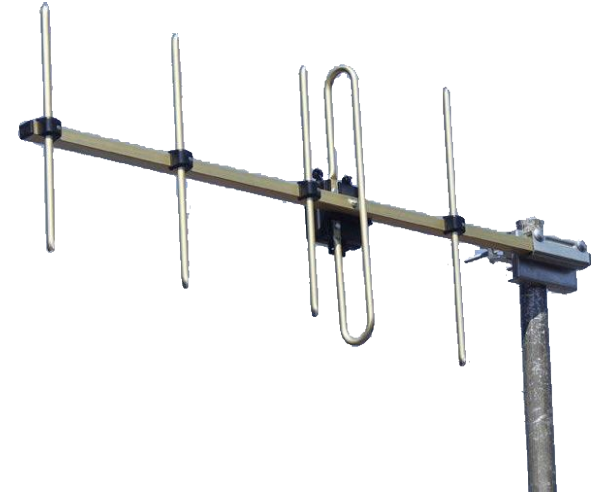
Высота над поверхностью Земли h	Расстояние до горизонта d	Пример места наблюдения
1,75 м	4,7 км	стоя на земле
25 м	17,9 км	9-этажный дом
50 м	25,3 км	колесо обозрения

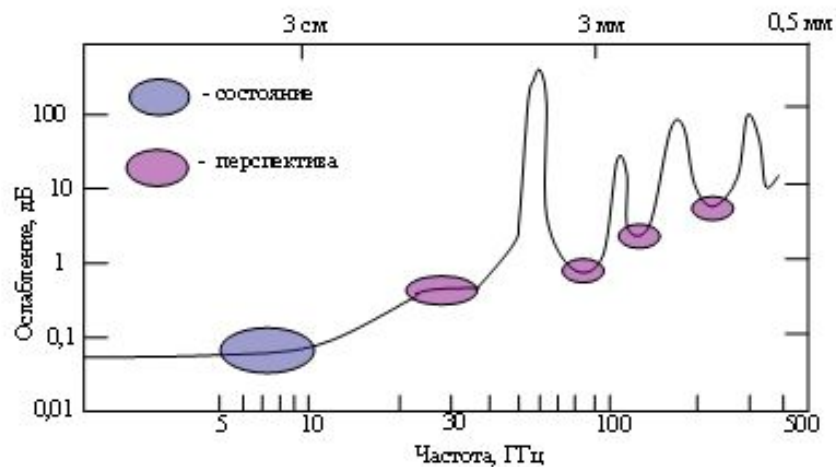


$$D_{BL} = 3.57 (\sqrt{h_B} + \sqrt{h_L})$$

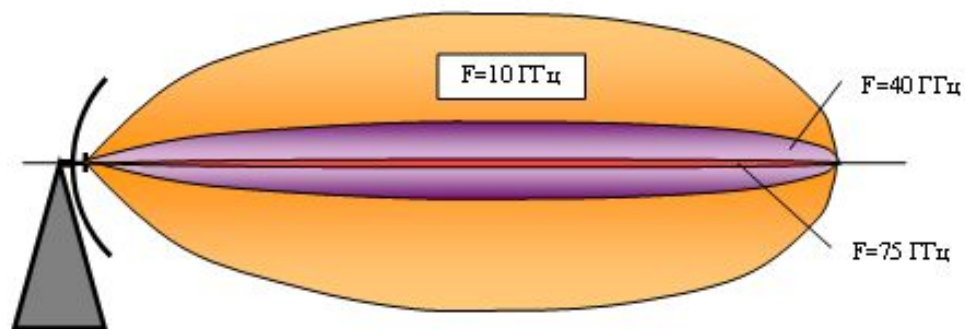


Антенные устройства

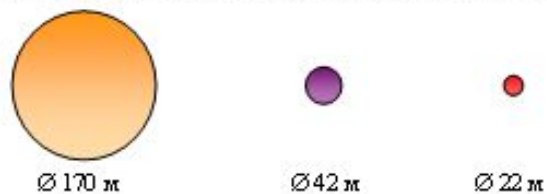




Название РЭС	назначение	Рабочая частота
SMART-T	Мобильный терминал скрытой помехоустойчивой с спутниковой связи	43,5-45,5 ГГц
Patriot PAC-III	ракетные головки самонаведения	26-40 ГГц
WARLOC	радар слежения за спутниками	75-110 ГГц
	РЛС посадки	35 ГГц
	РЛС космической разведки	96 ГГц
	Спец. связь	220 ГГц

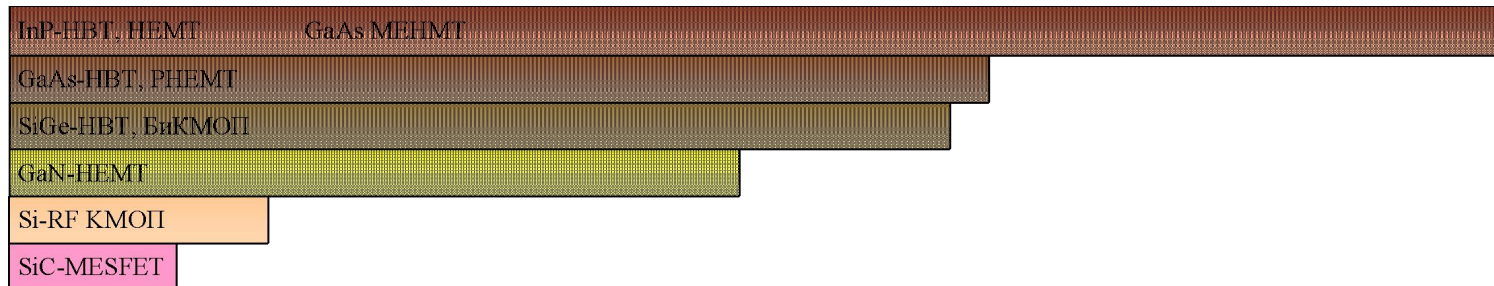
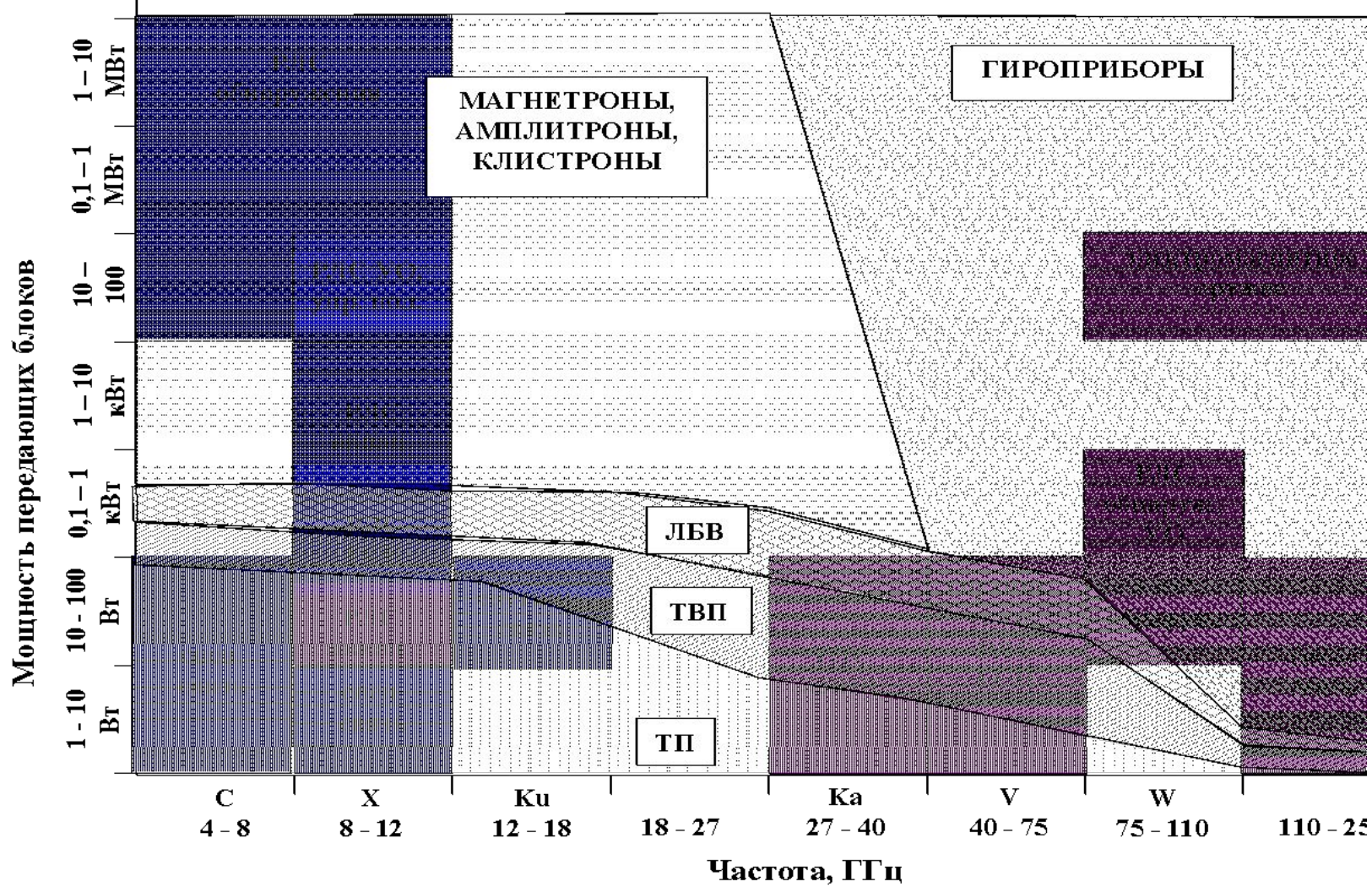


Сечение диаграммы направленности по уровню половинной мощности на расстоянии 5000 м

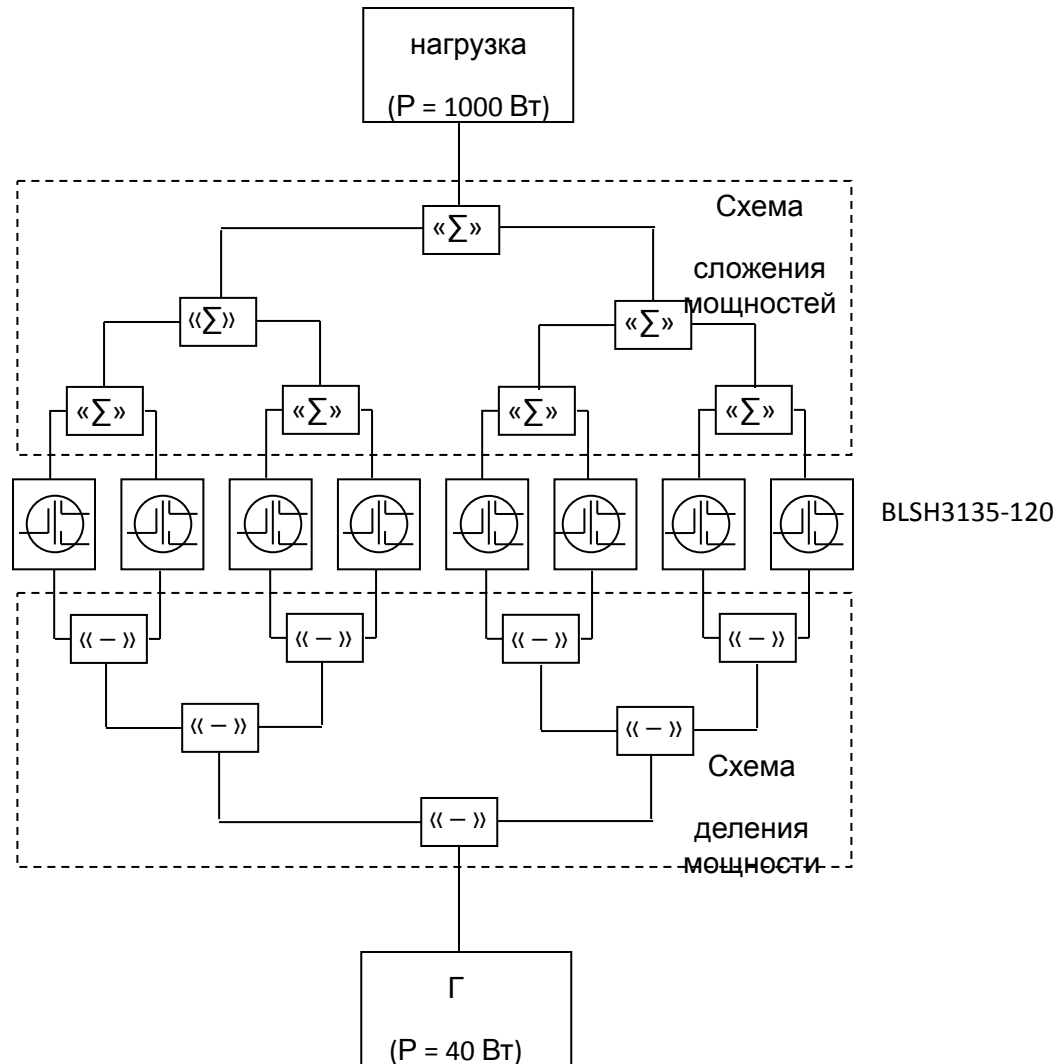


Конструктивное исполнение вакуумных свч приборов

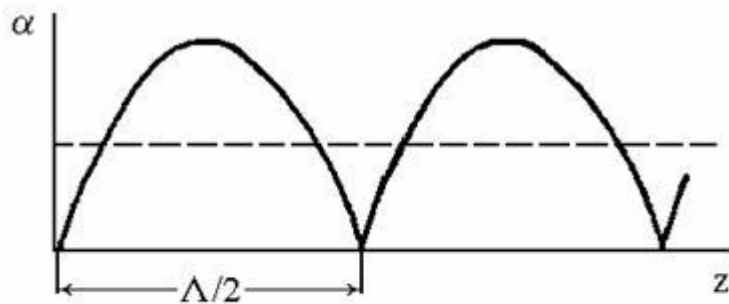
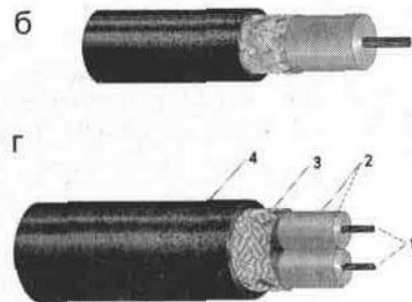
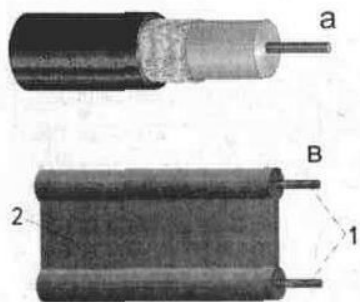




Принцип построения мощного твердотельного транзисторного усилителя



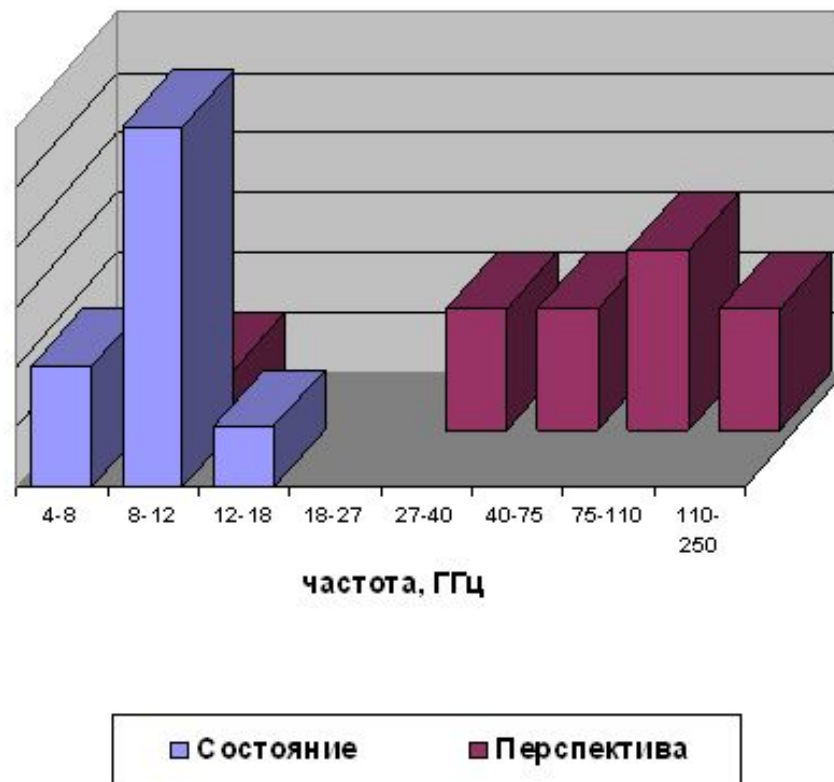
Основы теории длинных линий

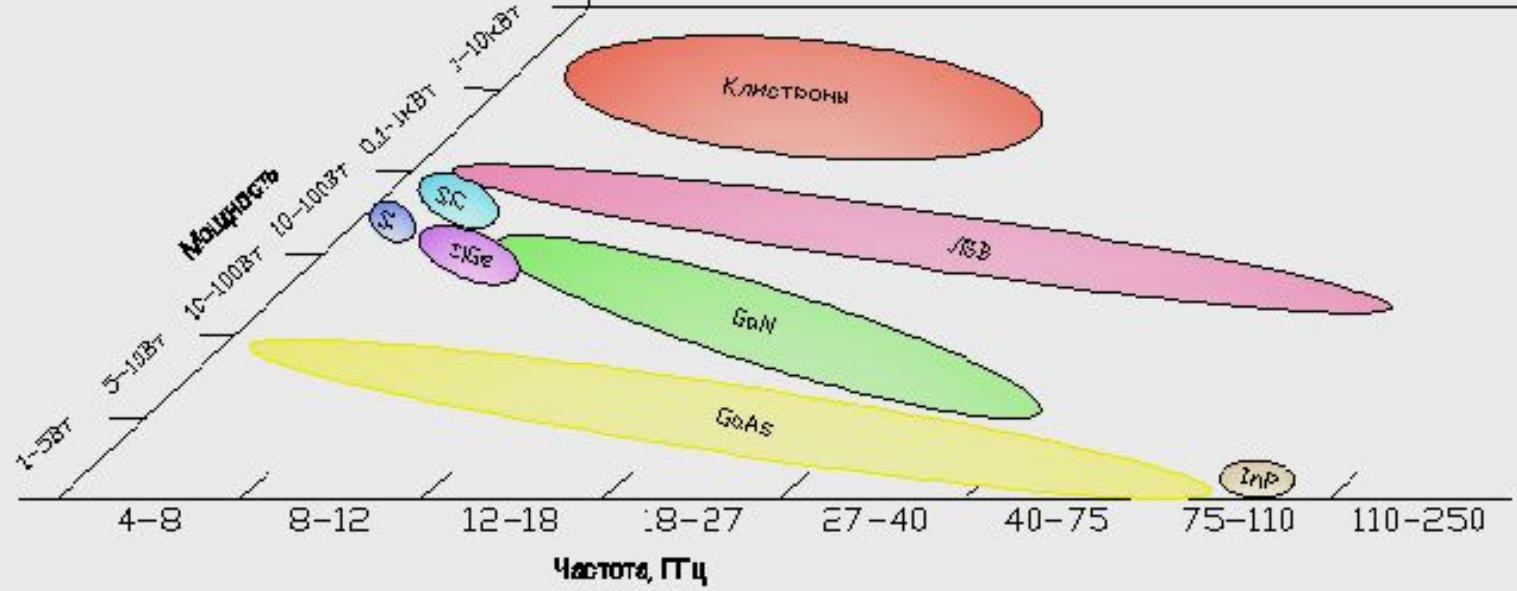
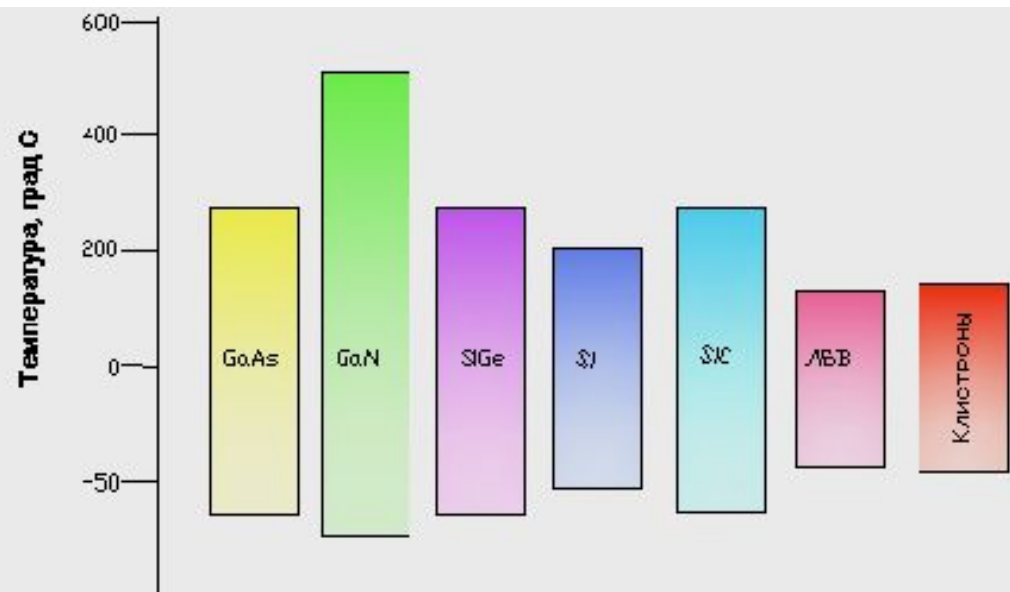


Частотные диапазоны работы принятых на вооружение и перспективных радиоэлектронных средств

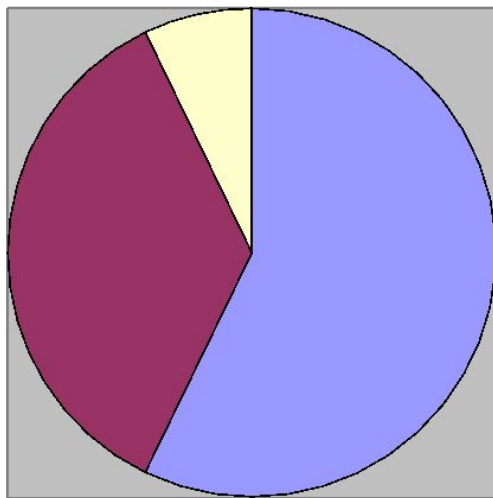
Частотный диапазон, ГГц		C	X	Ku	K	Ka	V	W	110 - 250
		4 - 8	8 - 12	12 - 18	18 - 27	27 - 40	40 - 75	75 - 110	110 - 250
Назначение РЭС									
радиолокация									
обнаружения	сост.	■	■						
	персп.							■	
управления оружием	сост.		■						
	персп.							■	
авиационная	сост.		■						
	персп.		■			■			
головки самонаведения	сост.		■			■			
	персп.						■		
Наземн. упр. полетами	сост.		■						
	персп.					■			
СВЯЗЬ									
спутниковая	сост.			■			■		
	персп.								
специальная	сост.	■	■						
	персп.								■
электромагнитное оружие									
								■	■
		- текущее состояние			- перспективные разработки				

Частота использования поддиапазонов в действующих и перспективных образцах РЭС



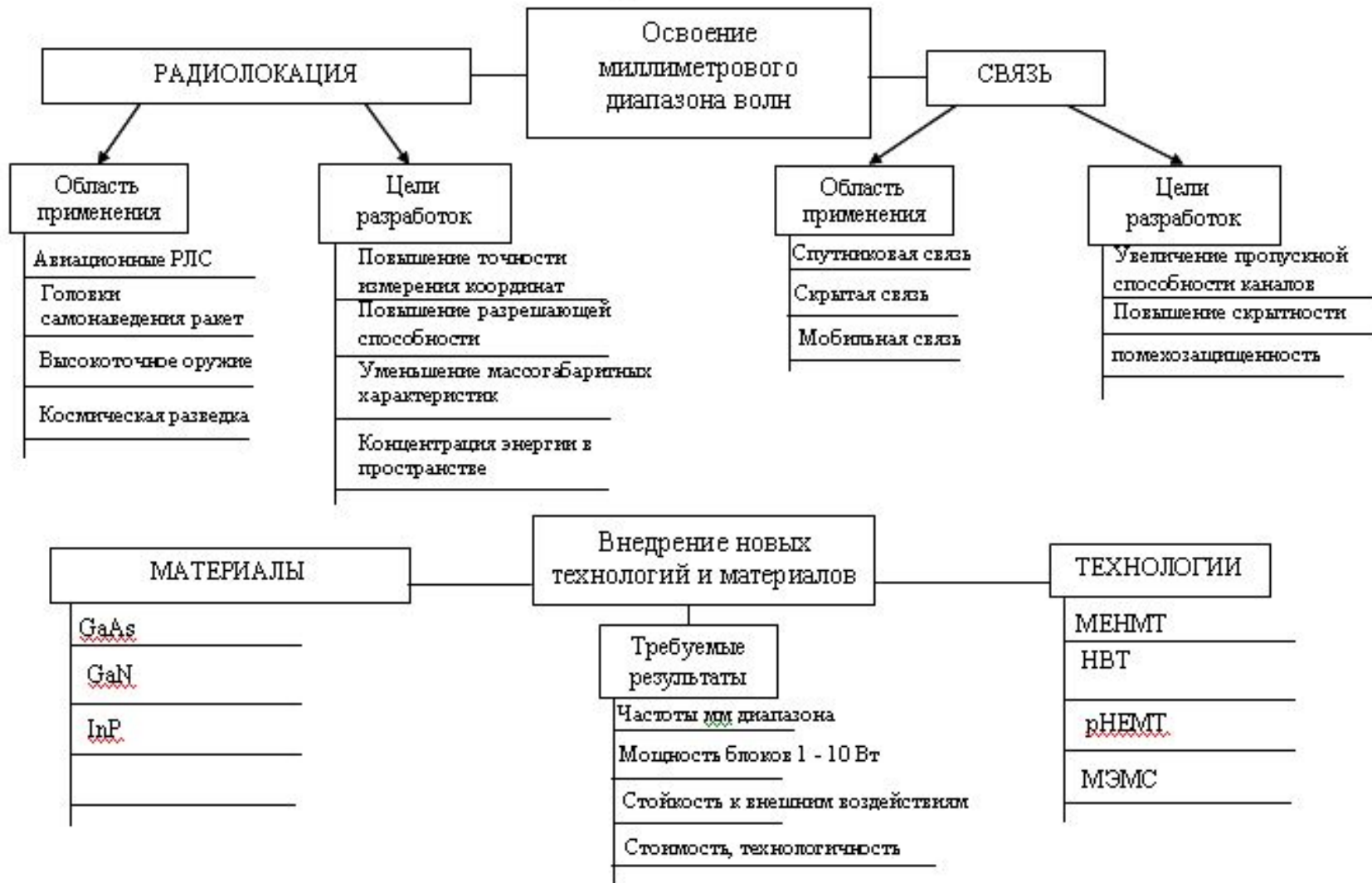


**Сравнительная характеристика массо-габаритных характеристик
ВЧ-модулей
(произведение - масса x объем)**



- твёрдотельные приборы (ТП)
- электровакуумные приборы (ЭВП)
- твёрдотельно-вакуумные приборы (ТВП)

**Основные направления разработок в области СВЧ
техники различного назначения**



МЭМ элемент производства RADANT MEMS

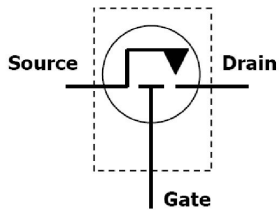


Figure 1 – Simplified Representation of a RF MEMS functional block diagram

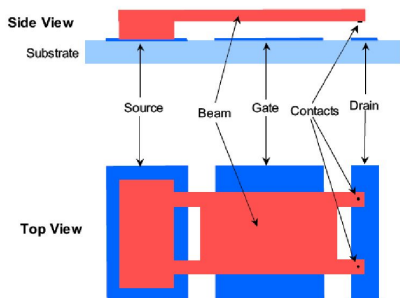
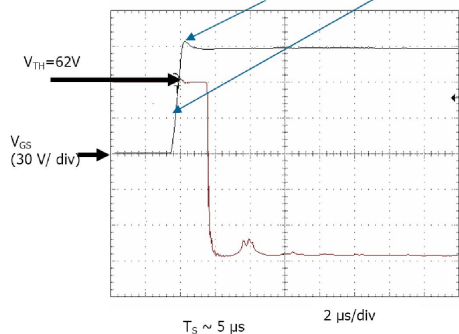


Figure 2 – Simplified Representation of a RF MEMS Switch Unit Cell

The rise time of the Gate must be 5µSec. Min.
The Over shoot must be less than 5%.



Switching Time – turn-on

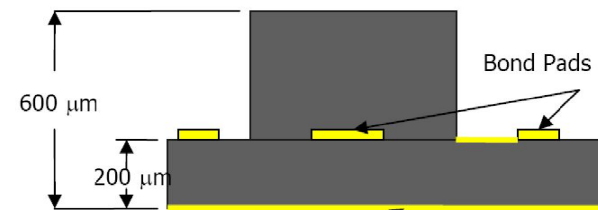
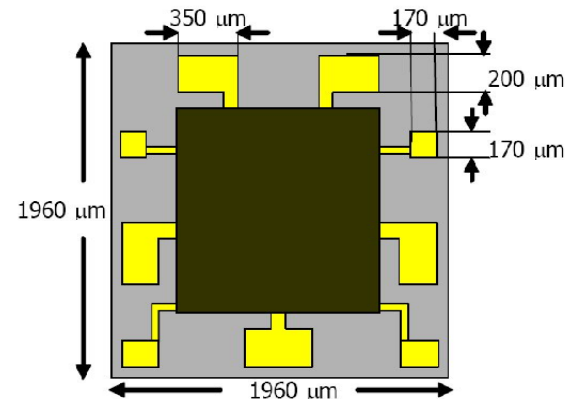
Features

- High Isolation (>25 dB typical @ 18 GHz)
- Low Insertion Loss (<0.4 dB @ 10 GHz, <0.7 dB @ 18 GHz)
- Near Zero Harmonic Distortion
- No Quiescent Power Dissipation
- Long Life (typical lifetime >100 billion cycles @ 27 dBm, >1 billion cycles @ 30 dBm)
- Hermetically sealed die designed for die-attach and wire-bond to board. Please contact us for other packaging options.

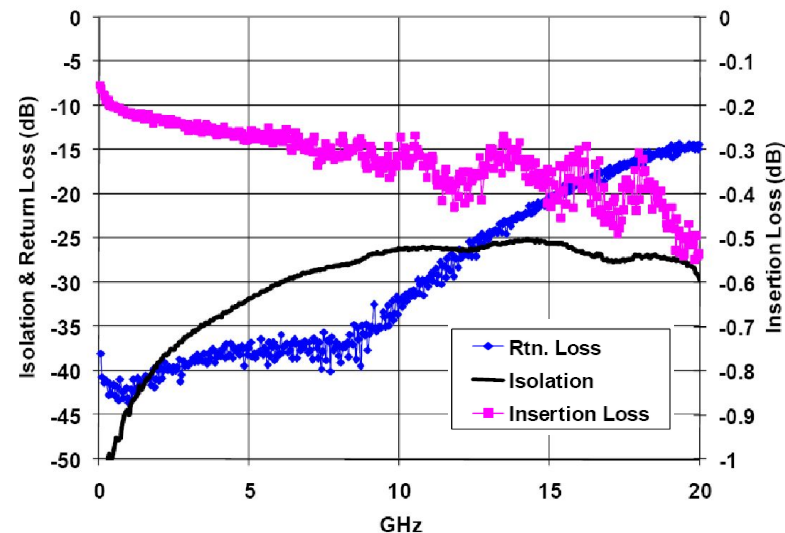
Typical Device Specifications

Lifecycle	
Cold-switched, 27 dBm	> 10 ¹¹ cycles
Cold-switched, 30 dBm	> 10 ⁹ cycles
Cold-switched, 33 dBm	> 10 ³ cycles
Hot-switched, -20 dBm	> 10 ¹¹ cycles
Hot-switched, -10 dBm	> 10 ⁹ cycles
Hot-switched, 20 dBm	> 10 ³ cycles
Control	
Gate-Source Voltage (on)	+/- 100 V
Gate-Source Voltage (off)	0 V
Control Power, steady-state	< 1 nW
Control Power, 1 KHz cycle rate	< 2 µW
Switching speed	
On	< 10 µs
Off	< 2 µs
Operating temperature	
Maximum	85 °C
Minimum	-40 °C
Storage temperature	
Maximum	150 °C
Minimum	-55 °C

Nominal Device Dimensions

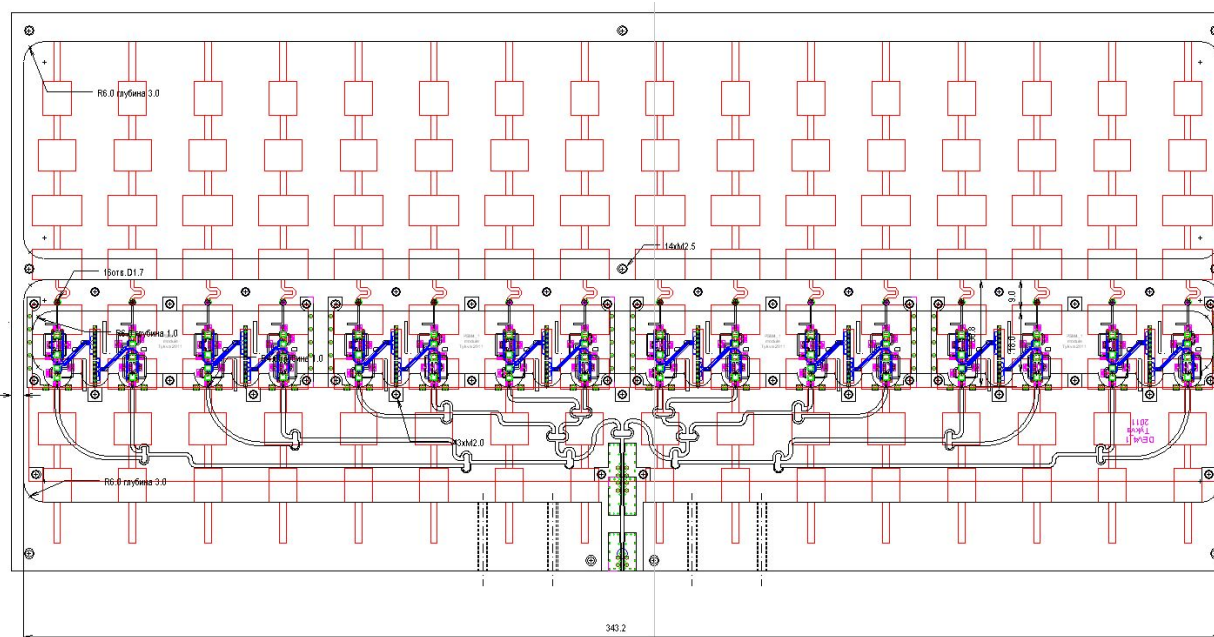
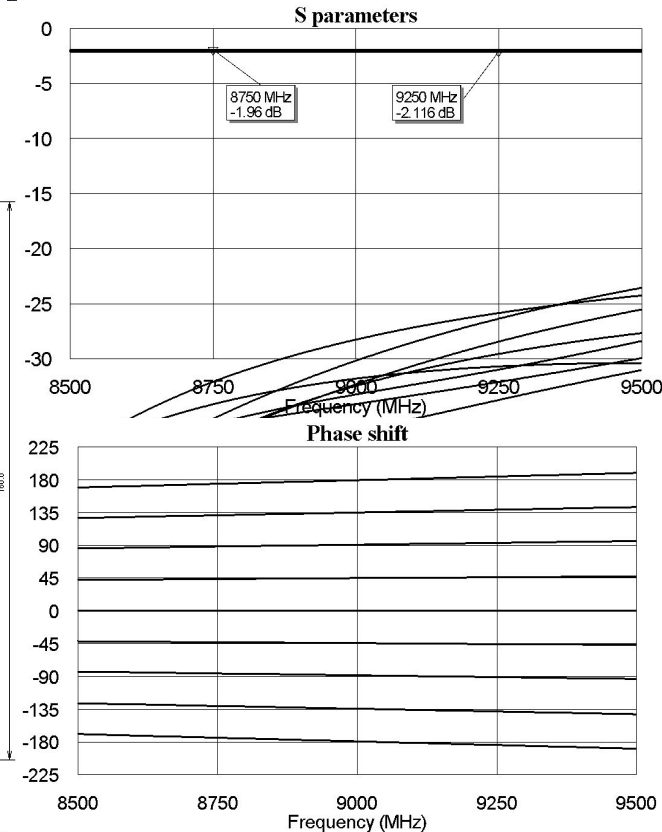
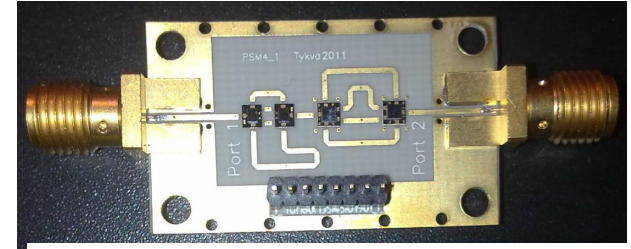


Typical RF Performance

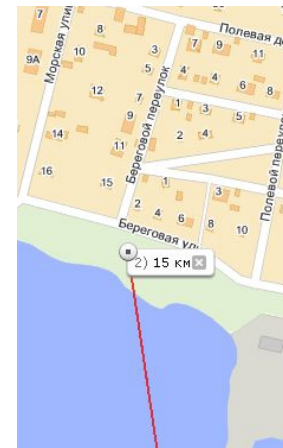
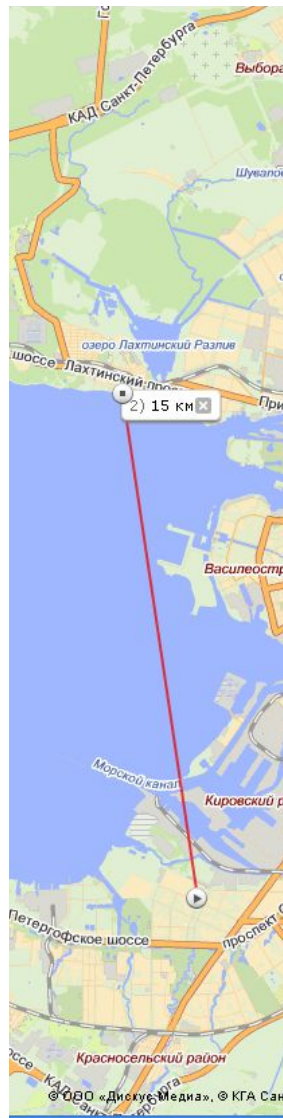


Фазовращатель и приемо-передающая ФАР 9 ГГц на основе МЭМС элементов

Область применения: Системы связи, радиолокации, радиоразведки с малым энергопотреблением.
Основные характеристики: $\theta_{гор.} = 20^\circ$, $\theta_{верт.} = 40^\circ$. Угол сканирования в горизонтальной плоскости ± 30 град.
Мощность потребления (при частоте сканирования 1 КГц) 1 Вт.



Испытания канала связи с применением ФАР 5,8 ГГц на МЭМС элементах



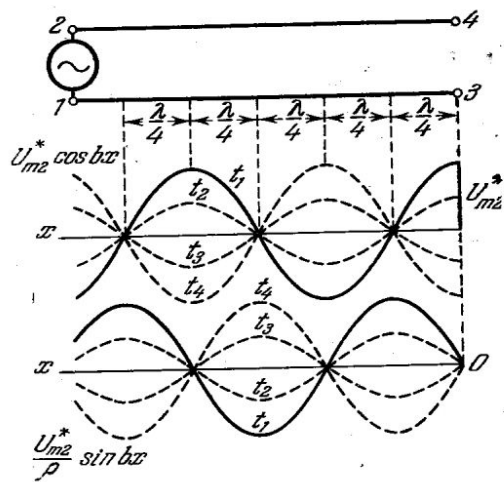
Тема 6. Основные конструктивные элементы СВЧ устройств

- Принципы излучения СВЧ сигналов.
- Антенны, волноводы, коммутаторы, фазовращатели, линии задержки, поглотители.
- Малогабаритные 2D и 3D антенны
- Использование RFID технологий
- Экранирование и поглощение электромагнитных излучений
- Использование RFID технологий

...

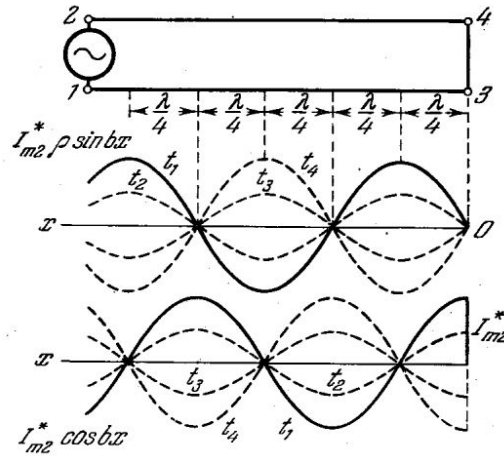
Основы теории длинных линий

Распределение тока и напряжения в длинной линии



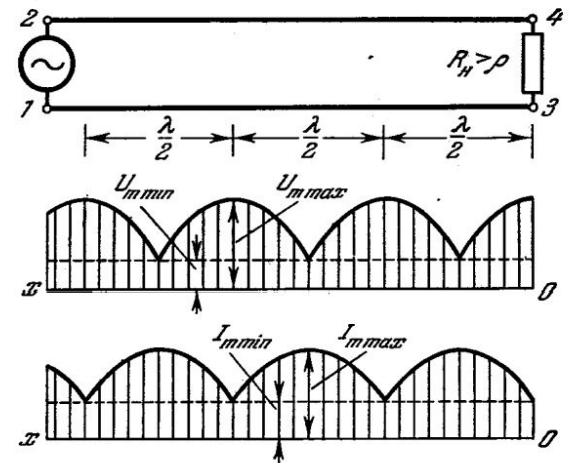
Разомкнутая
линия

$$U = U_H \cos(\beta z)$$



Короткозамкнутая
линия

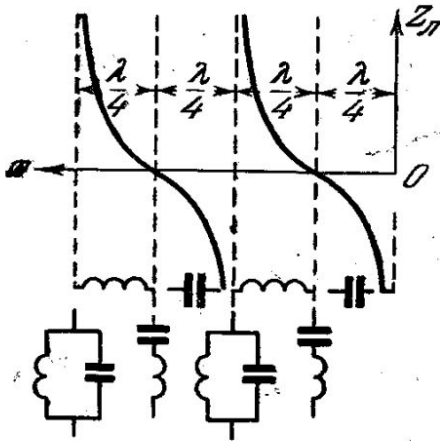
$$U = i I_H W \sin(\beta z) \quad |U| = U_H \sqrt{\cos^2(\beta z) + \left(\frac{W}{R_H}\right)^2 \sin^2(\beta z)}$$



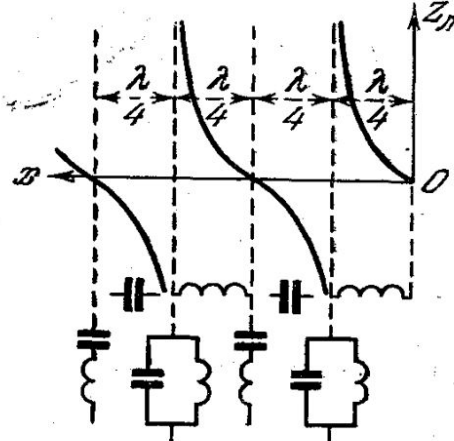
Нагруженная
линия

$$КСВ = \frac{1}{КБВ} = \frac{U_{max}}{U_{min}}$$

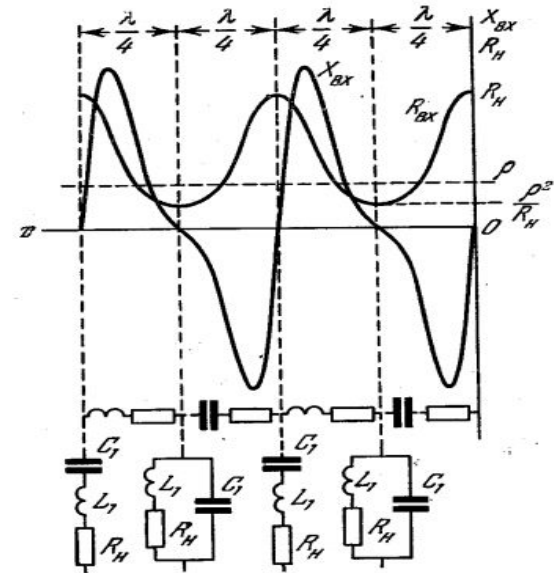
Входное сопротивление длинной линии



Разомкнутая
линия



Короткозамкнутая
линия



Нагруженная
линия

$$Z_{\text{вх}} = Z_0 \frac{Z_{\text{н}} + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_{\text{н}} \tan \beta l}$$

Энергетические характеристики электромагнитного излучения

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \frac{1}{D_1 D_2}$$

P_1 – мощность передатчика

P_2 – мощность на входе приемника

r – расстояние от передатчика до приемника

D – коэффициент направленного действия антенн

Задачи, решаемые антенной:

- Преобразование энергии токов высокой частоты в энергию излучаемых радиоволн.
- Пространственное распределение энергии электромагнитного поля.
- Формирование определённой поляризационной структуры поля.

Классификация антенн:

- По функциональному назначению:
 - приёмные;
 - передающие;
 - приёмно-передающие.
- По конструкции и принципу действия:
 - линейные;
 - апертурные;
 - антенные решётки.

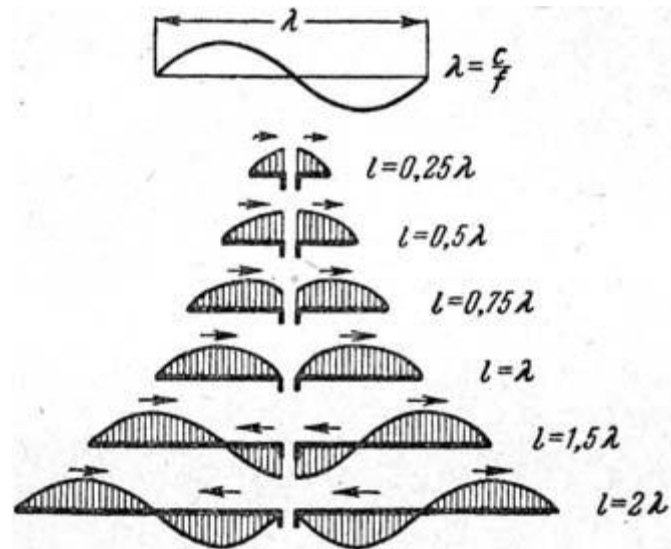
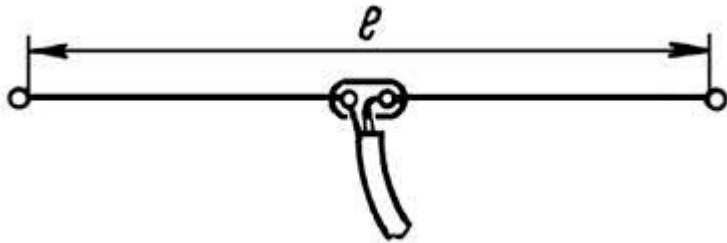
Основные энергетические характеристики антенн

- Мощность излучения
- Сопротивление излучения
- Входное сопротивление

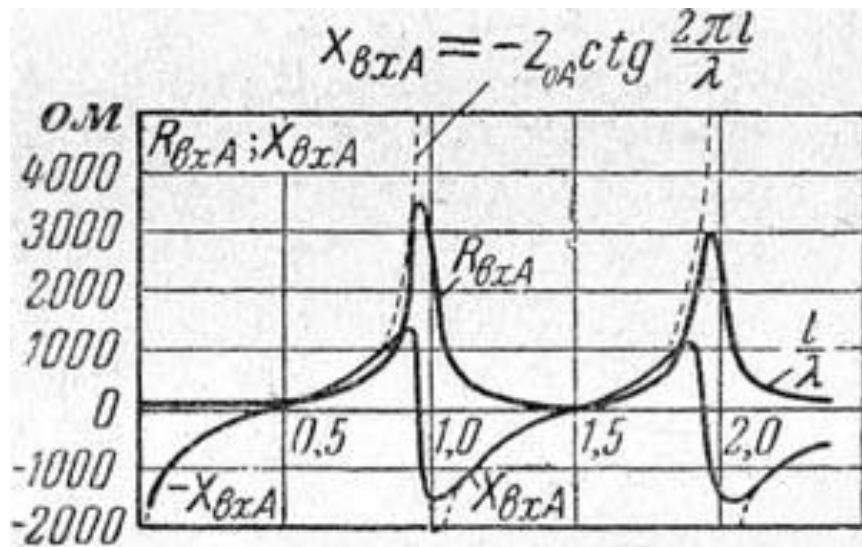
Направленные свойства антенн

- Диаграмма направленности
- Ширина диаграммы направленности
- Уровень боковых лепестков
- Коэффициент направленного действия

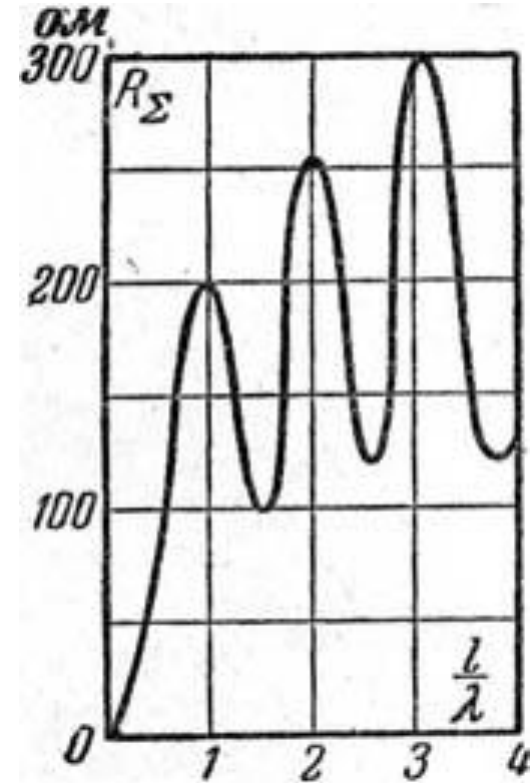
Распределение напряжения в антенне типа диполь



Энергетические характеристики антенн

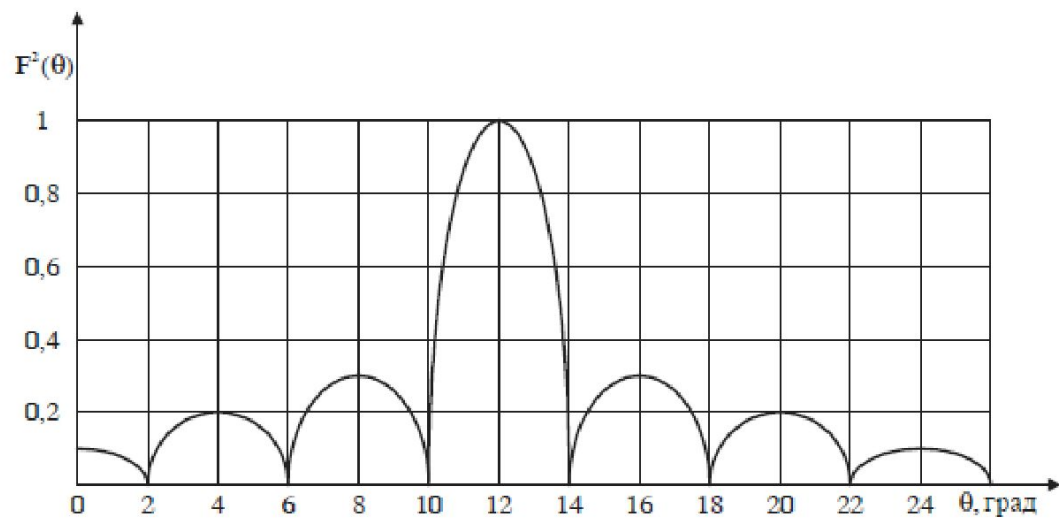
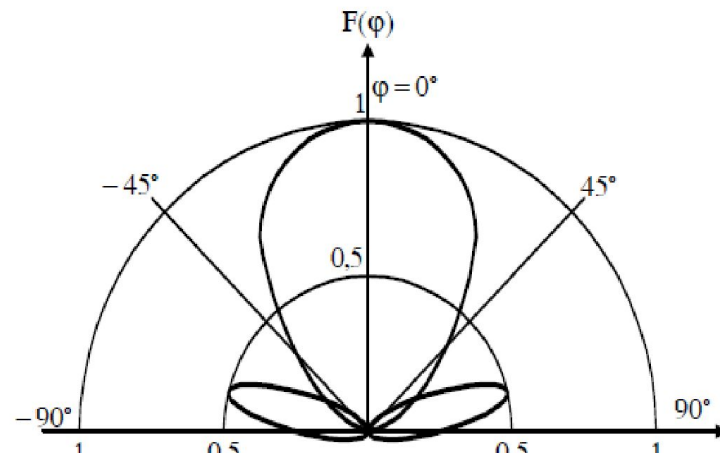
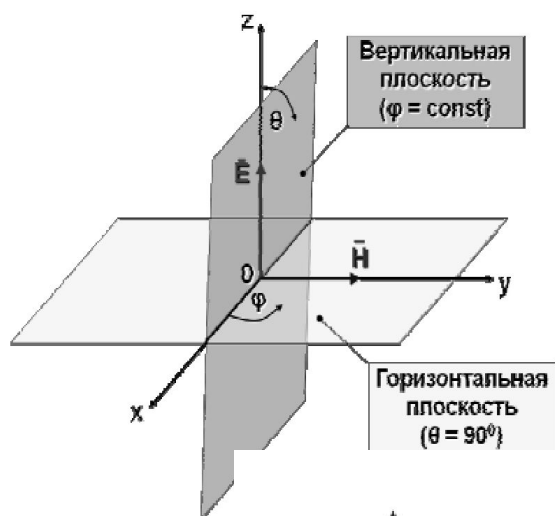


Входное сопротивление



Сопротивление излучения

Диаграмма направленности антенны



Расчетные соотношения для диаграмма направленности диполя

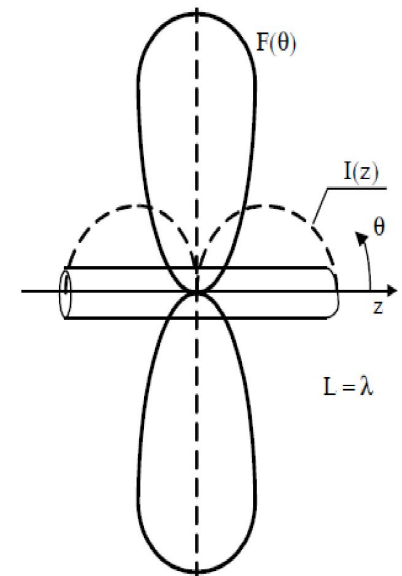
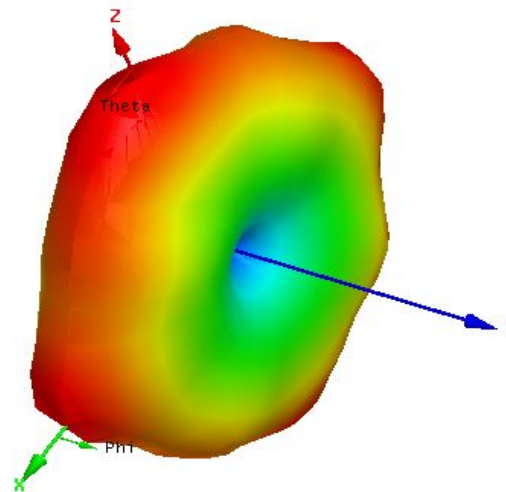
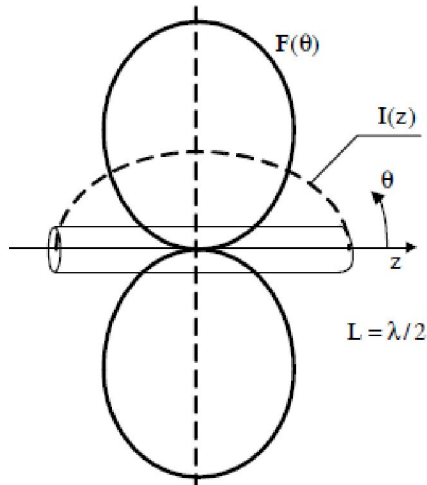
$$F(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta}$$

Для $\lambda / 2$

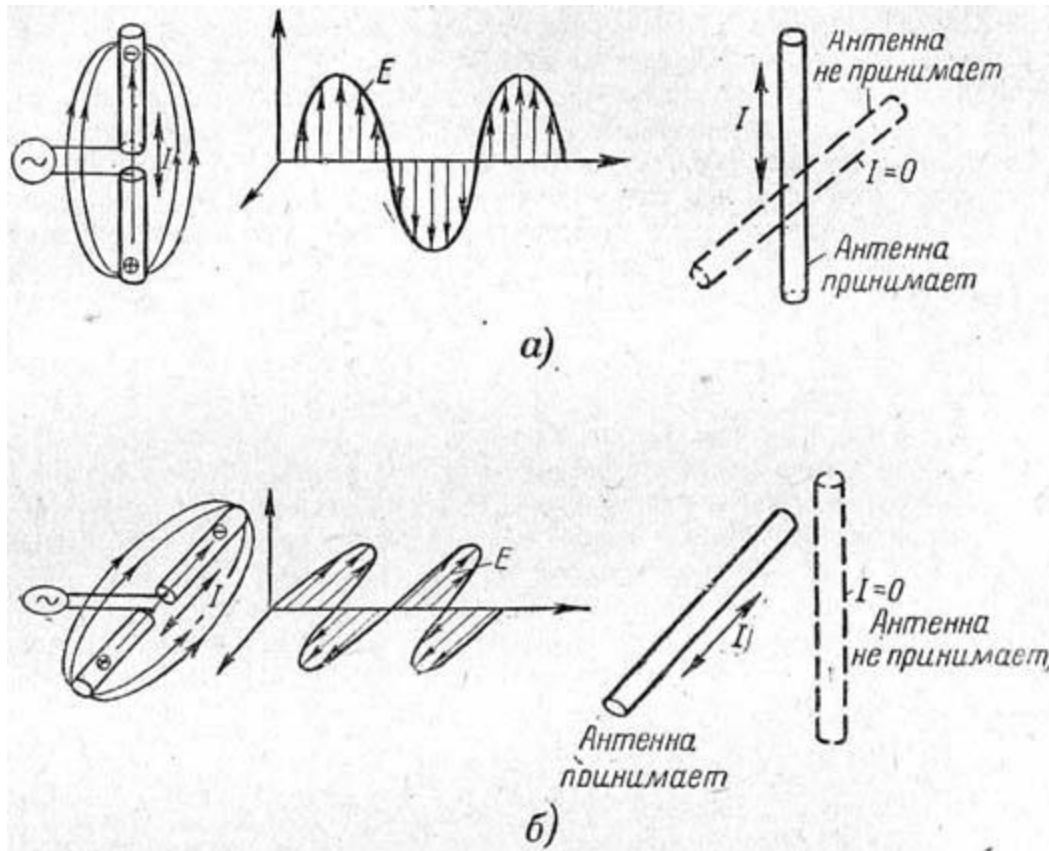
$$F(\theta) = \frac{\left| \cos\left(\frac{kL}{2} \cos \theta\right) - \cos \frac{kL}{2} \right|}{\sin \theta}$$

$$F(\theta) = \left| \frac{\cos(\pi \cos \theta) + 1}{\sin \theta} \right| = 2 \left| \frac{\cos^2\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \right|$$

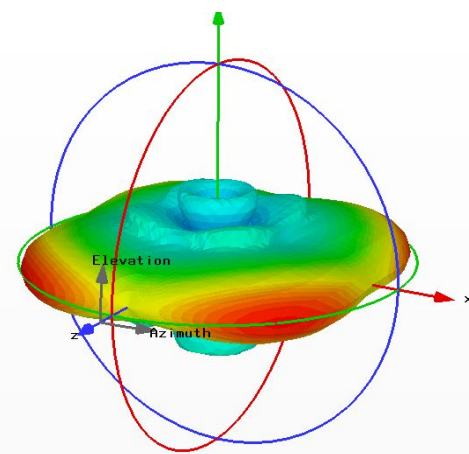
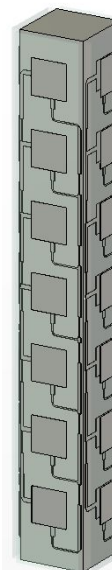
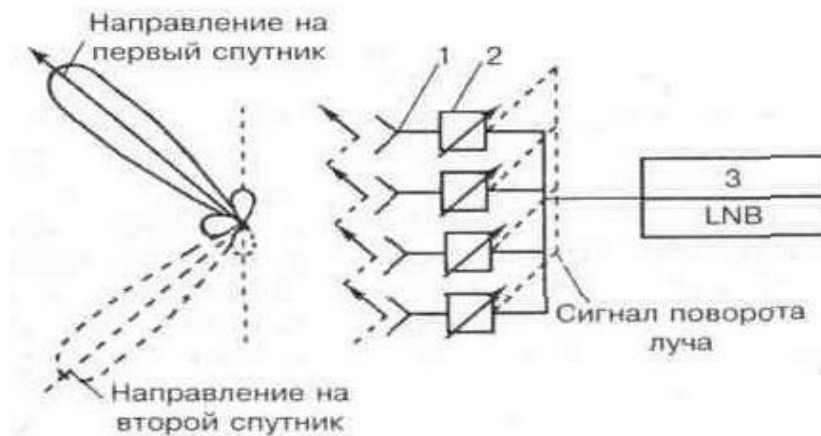
Для λ



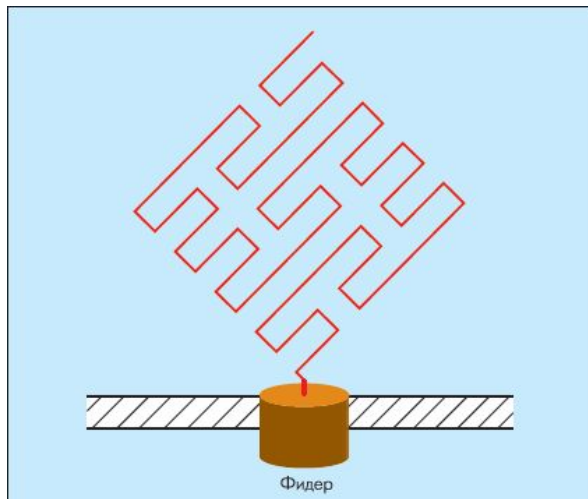
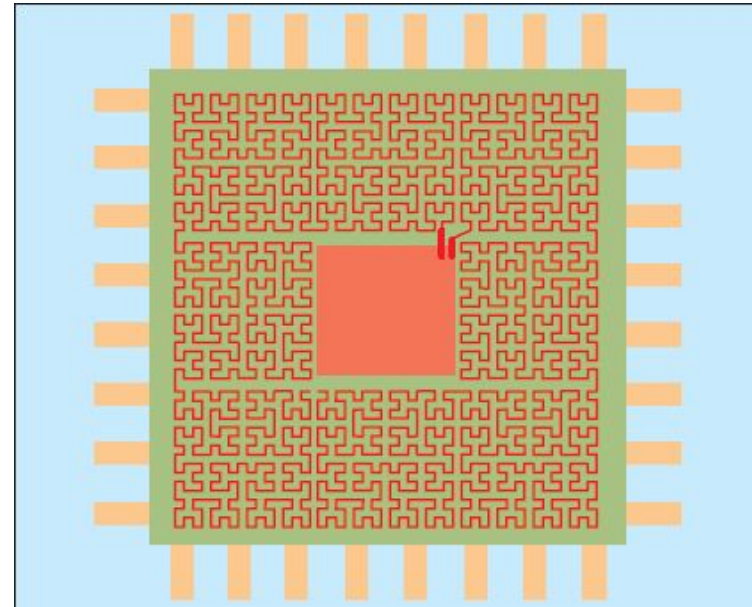
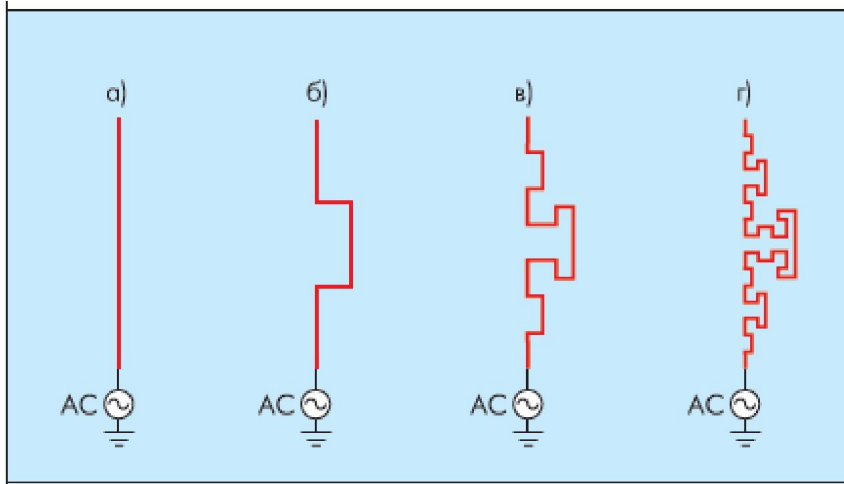
Поляризационные характеристики диполя



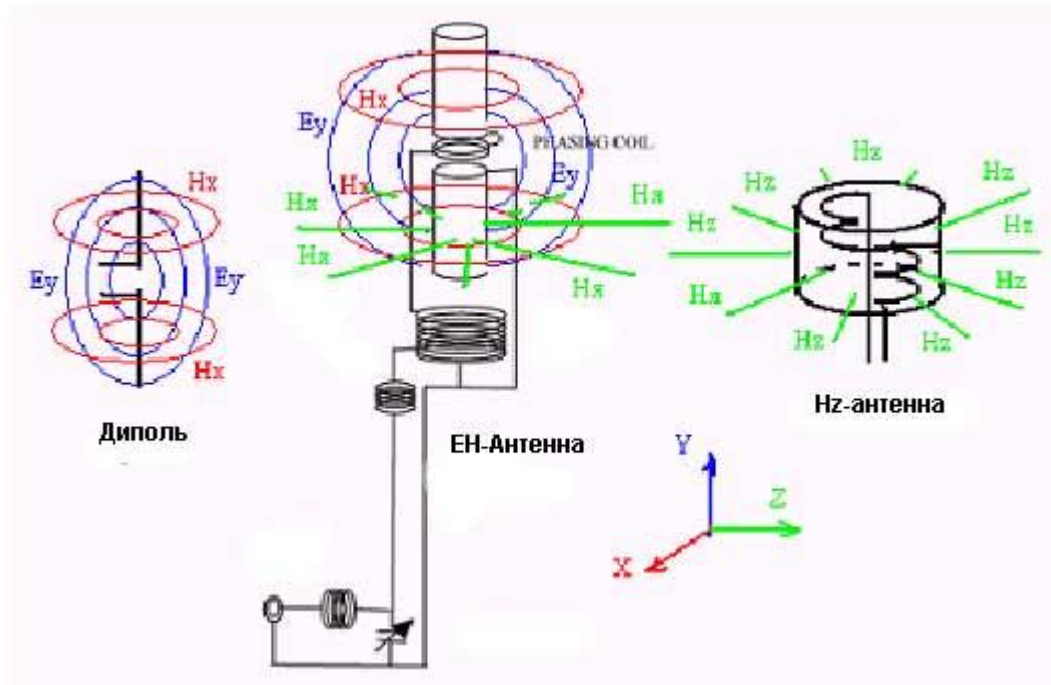
Фазированные антенные решетки



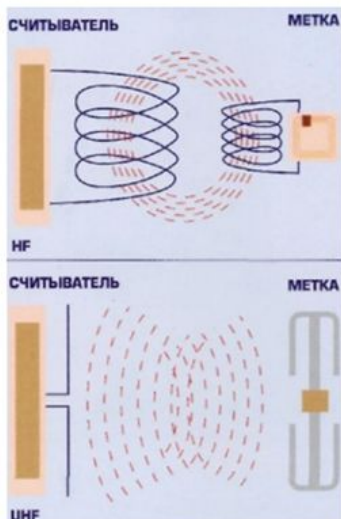
Фрактальные антенны



EH антенны



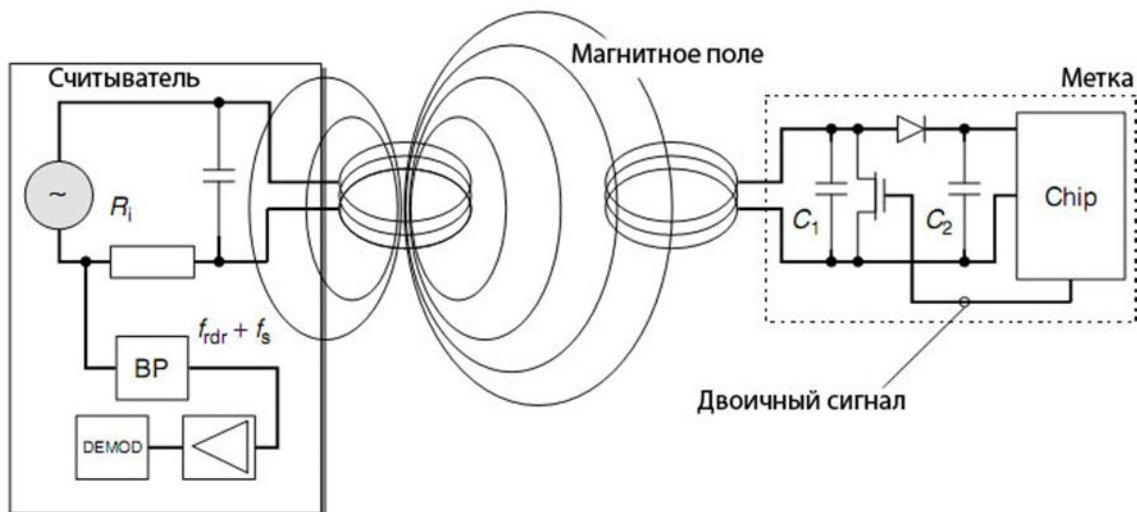
Принцип действия RFID устройств



Индуктивная связь
(принцип трансформатора)

Обратное рассеивание
(принцип радиолокатора)

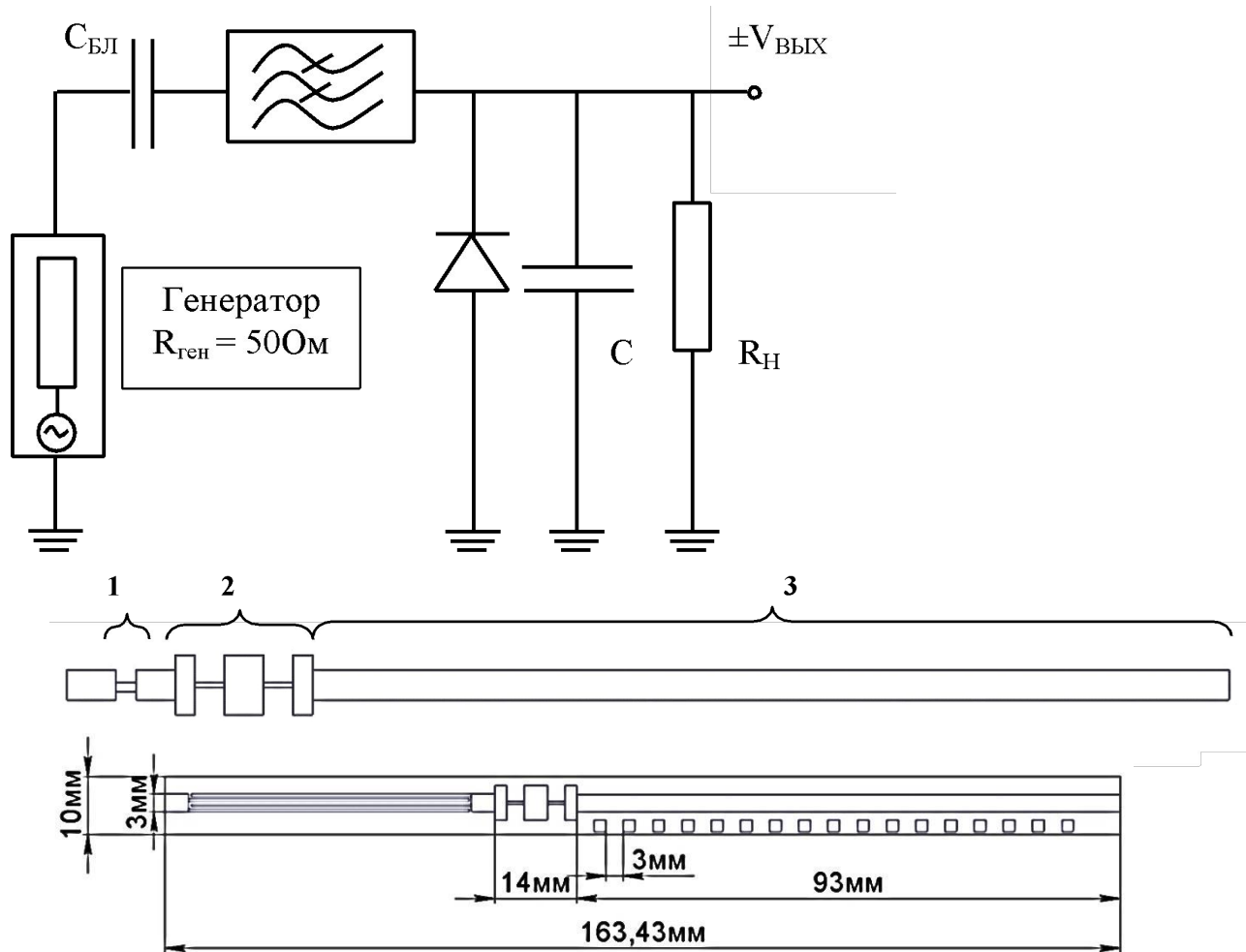
RFID (Radio Frequency IDentification, радиочастотная идентификация) — способ автоматической идентификации объектов, в котором посредством радиосигналов считываются или записываются данные, хранящиеся в так называемых транспондерах или RFID-метках.



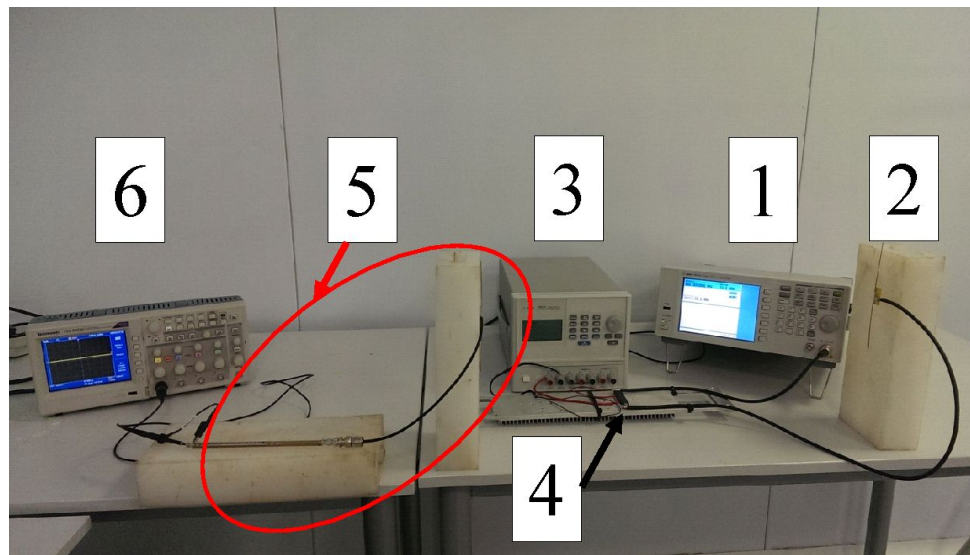
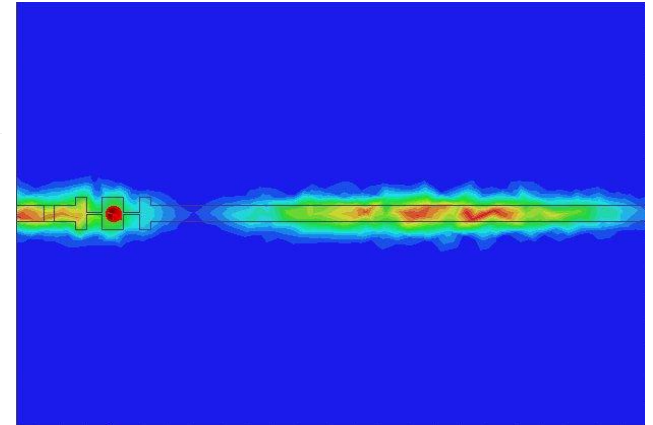
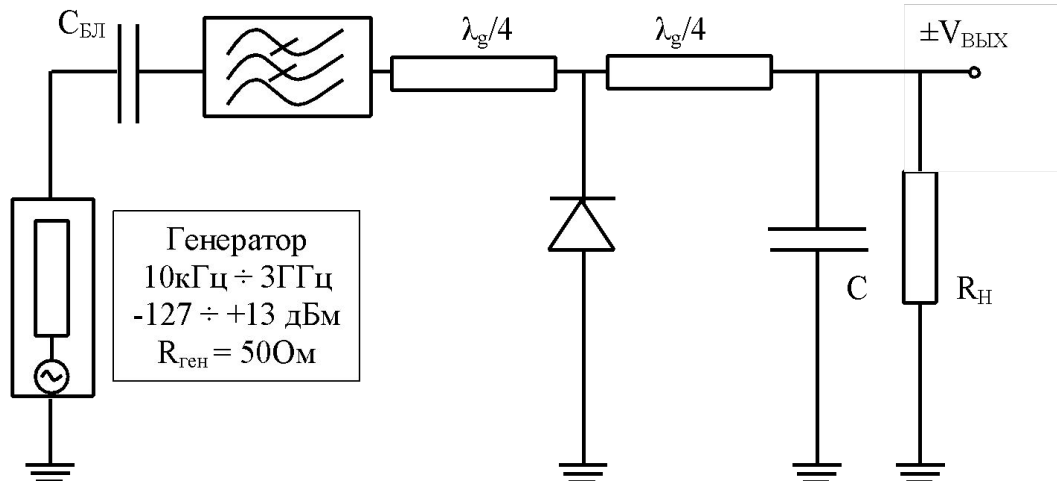
Принцип действия RFID устройств

Стандарт	Частота	Приложения	Примечания
ISO 14223 ISO 11784/11785	125 (134) кГц	для идентификации животных (в том числе, домашнего скота)	используется широко (например, в автомобильных иммобилайзерах)
ISO 14443 ISO 15693 ISO 10373	13,56 МГц	смарт-карты метки методы тестирования карт	
ISO 18000	800 ... 2,45 ГГц	метки с увеличенной дальностью	

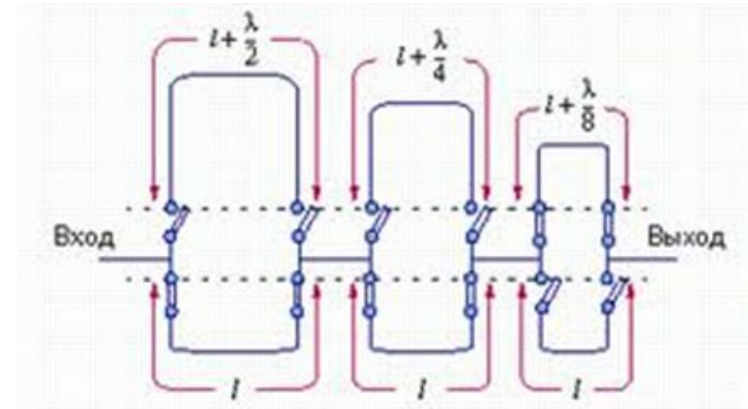
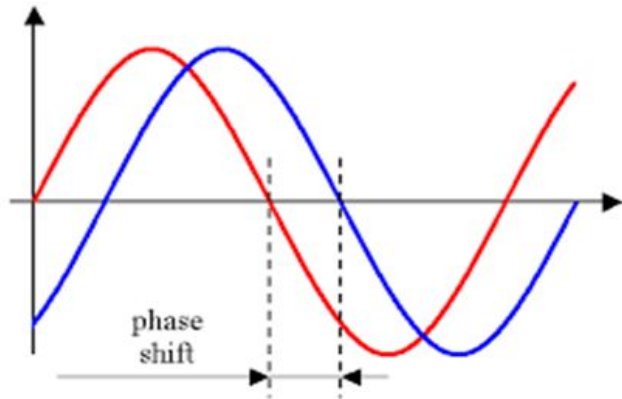
Принцип действия ректенных преобразователей



Принцип действия ректенных преобразователей



Принцип действия дискретных фазовращателей



$$\lambda_k = \frac{\lambda_{св}}{\delta} = \frac{\lambda_{св}}{\sqrt{\epsilon}}$$

Принцип действия дискретных фазовращателей

