



Спутниковые системы связи

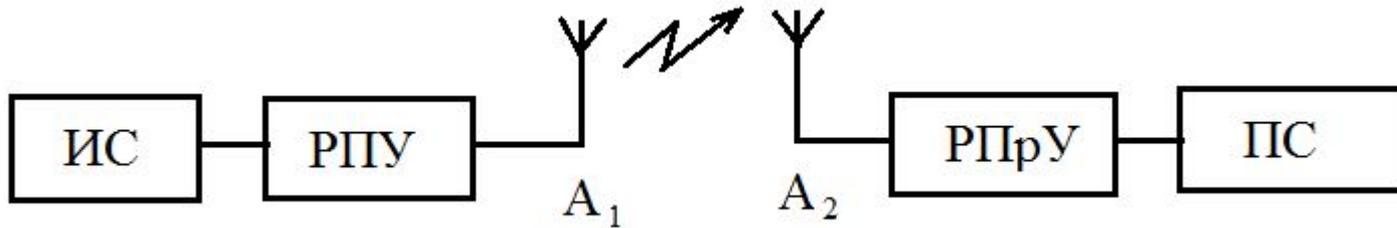
Р.В. Комягин

Москва, 2015

Обобщенная структурная схема системы связи

Симплексная система связи

(передача информации ведется только в одном направлении)



РПУ – радиопередающее устройство

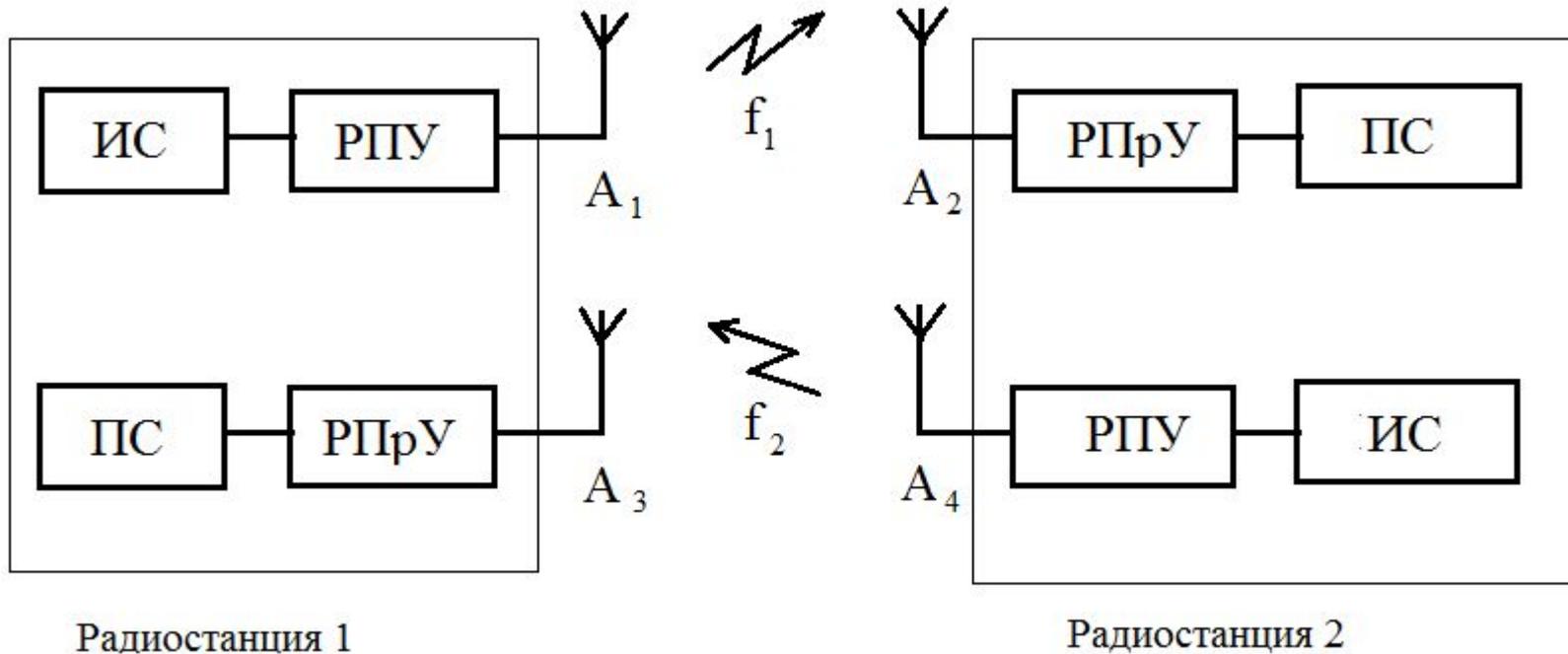
РПpУ – радиоприемное устройство

А1, А2 – передающая и приемная антенны

ИС – источник сообщения

ПС – получатель сообщения

Дуплексная (полудуплексная) система связи



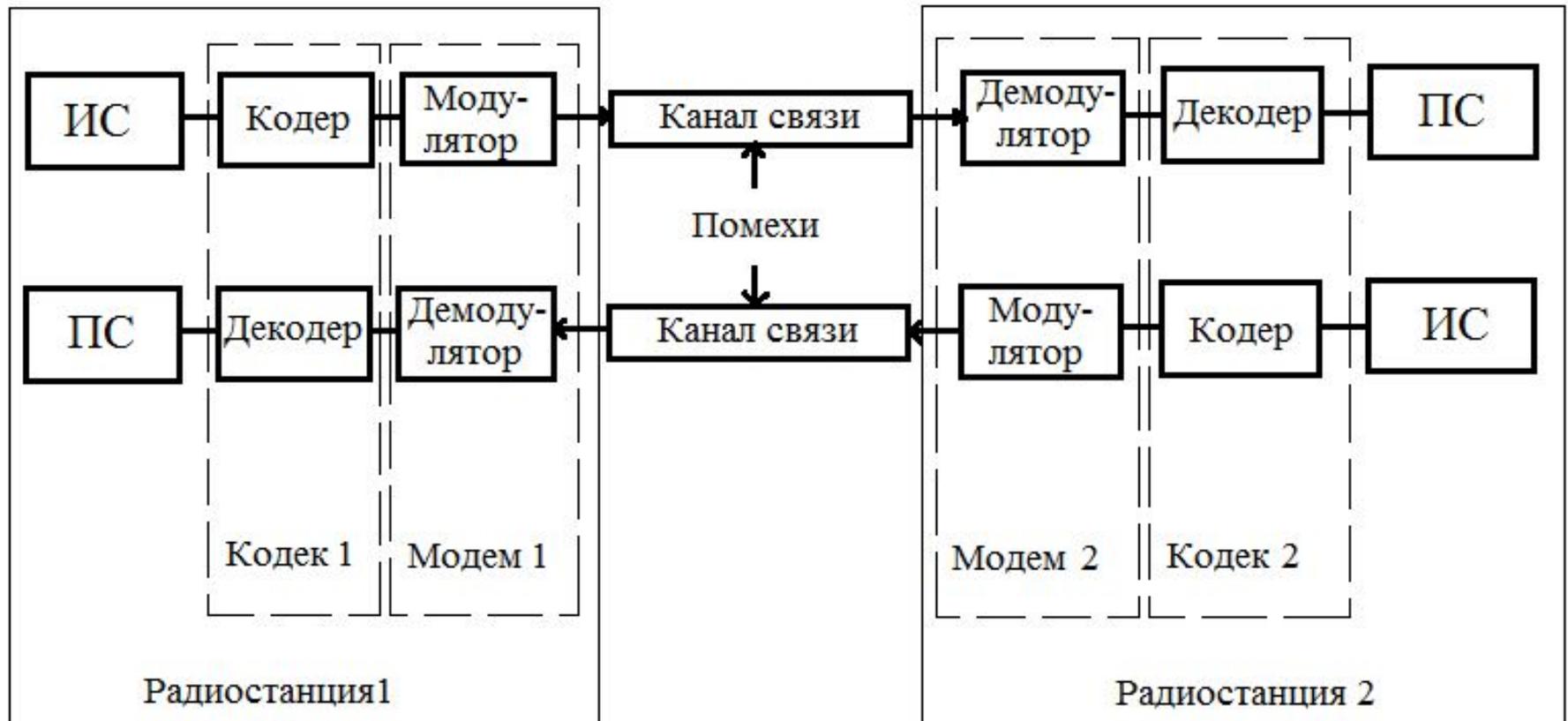
Дуплексная система – передача информации ведется в двух направлениях *одновременно*

Полудуплексная система – передача информации ведется в двух направлениях *поочередно*



Спутниковые системы связи

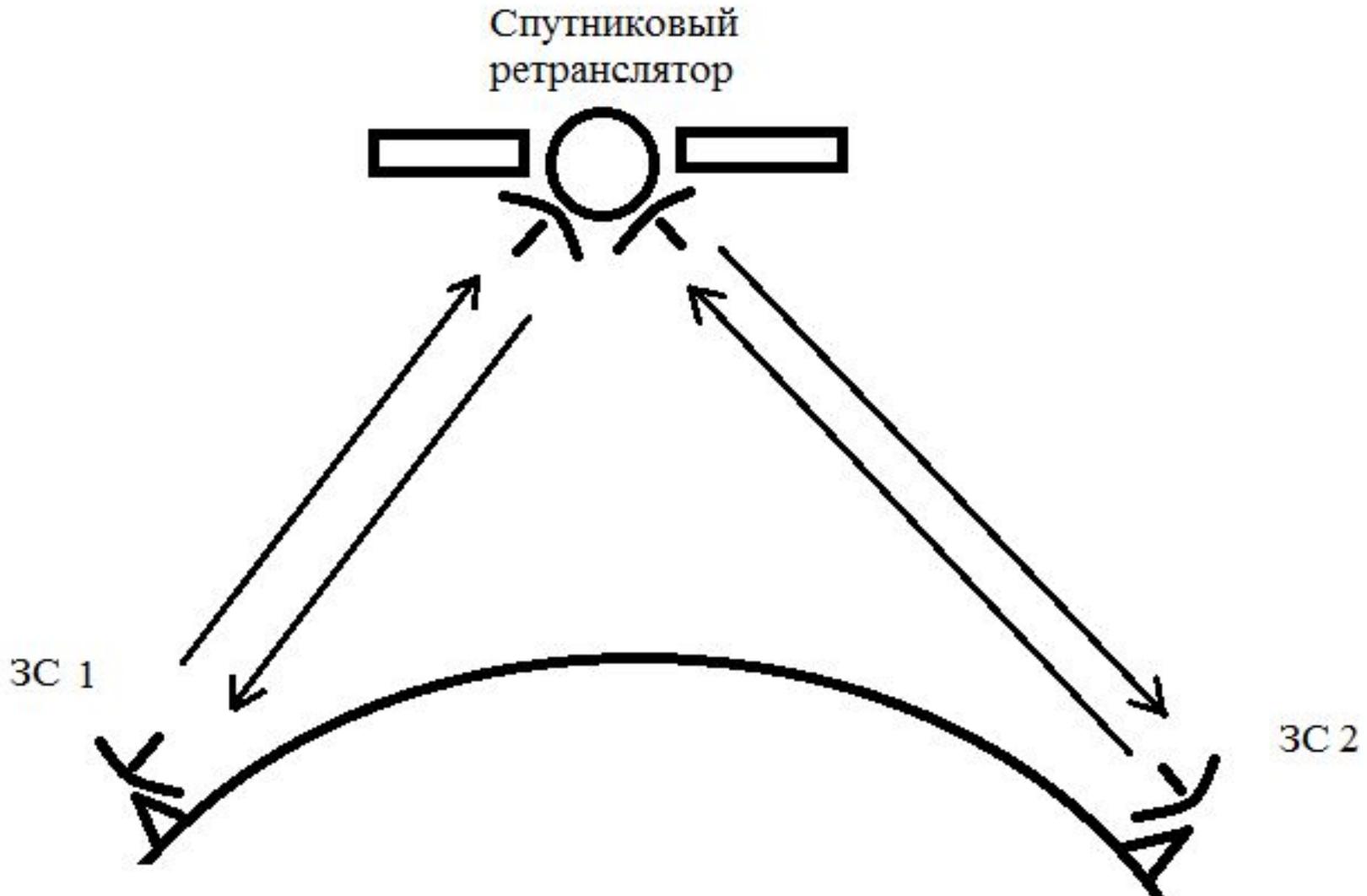
Состав радиопередающего и радиоприемного устройств системы связи



Система связи с ретрансляторами



Спутниковая система связи



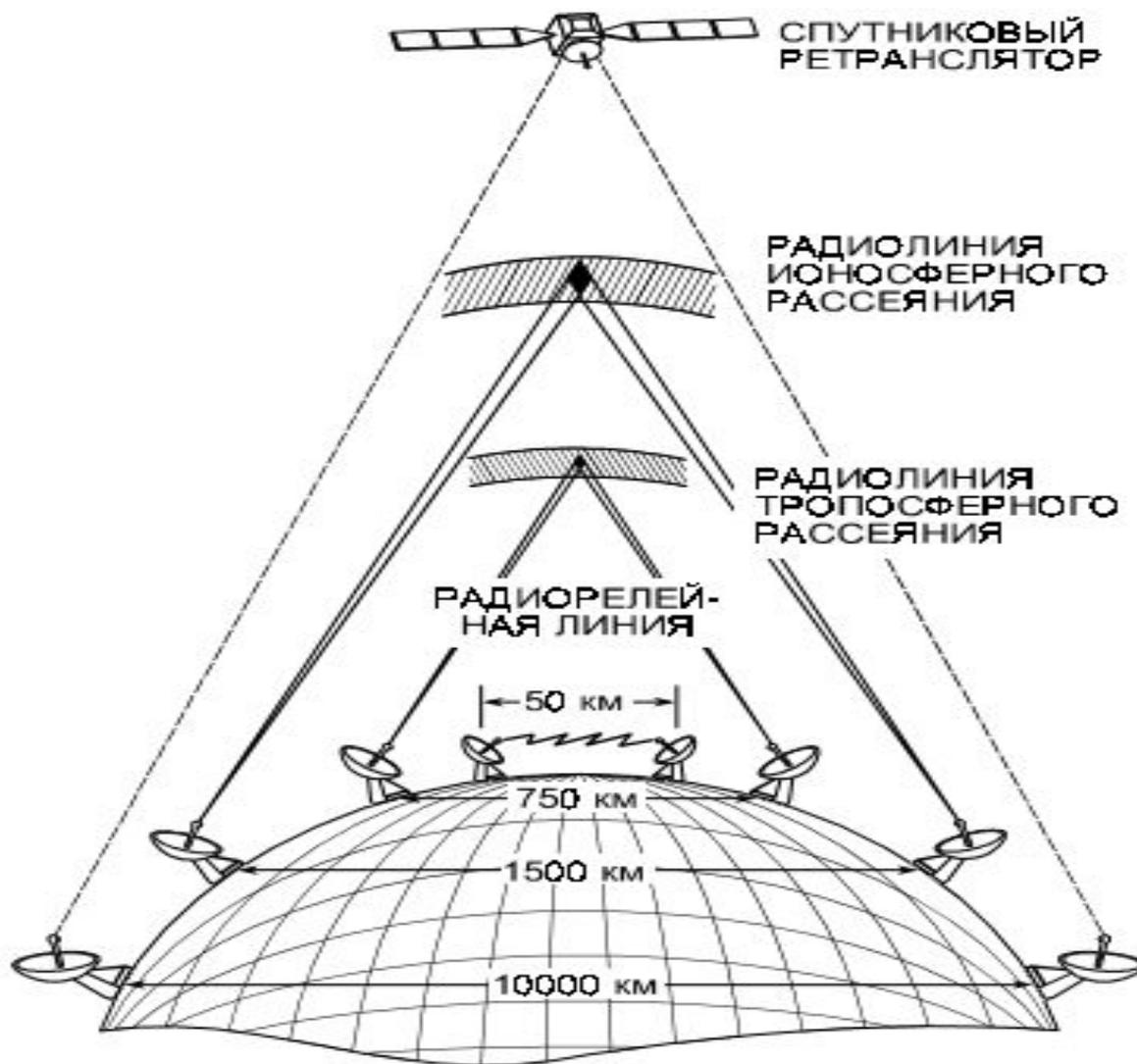


Достоинства систем спутниковой СВЯЗИ

- 1) возможность обслуживания большого количества абонентов, удаленных на значительные расстояния и расположенных в любых регионах Земли;
- 2) простота реконфигурации систем спутниковой связи (ССС) при изменении мест расположения абонентов;
- 3) независимость затрат на организацию связи от расстояния между объектами.



Спутниковые системы связи





Классификация систем спутниковой связи

По охватываемой территории:

- 1) **Глобальные** – системы со всемирным охватом («Интерспутник», Intelsat);
- 2) **Региональные**, ЗС которых расположены в пределах региона, охватывающего, как правило, несколько стран (Eutelsat, Arabsat);
- 3) **Зоновые**, все ЗС которых расположены в пределах одной из зон (районов) страны;
- 4) **Ведомственные** (деловые, корпоративные), ЗС которых принадлежат одному ведомству и передают только деловую информацию и данные в интересах ведомства.



Спутниковые системы связи





Спутниковые системы связи

По принадлежности спутниковые системы связи (ССС) подразделяются на

- 1) международные;
- 2) национальные;
- 3) корпоративные.

В СССР осуществляется передача следующих видов информации:

- 1) программ телевидения и звукового вещания и других видов симплексных сообщений циркулярного характера;
- 2) телефонных, факсимильных, телеграфных сообщений, видеоконференций, цифровых передач (симплексных или дуплексных по своему характеру).



Спутниковые системы связи

В зависимости от типа ЗС и назначения ССС различают следующие службы радиосвязи:

- 1) фиксированную спутниковую службу (ФСС), соответствующую режиму радиосвязи между ЗС, расположенных в фиксированных пунктах при использовании одного или нескольких спутников;
- 2) подвижную спутниковую службу (ПСС), соответствующую режиму радиосвязи между подвижными ЗС при использовании одного или нескольких спутников;
- 3) радиовещательную спутниковую службу (РСС), соответствующую режиму циркулярной радиосвязи.



Спутниковые системы связи

Орбиты ИСЗ





Спутниковые системы связи

Орбиты ИСЗ

Период обращения T , ч	Число витков в сутки N	Высота круговой орбиты H , км	Высота эллиптической орбиты	
			Перигей H_s	Апогей H_A
1 ч 36 мин	15	700	—	—
1 ч 43 мин	14	1350	—	—
4	6	6750	500	13000
6	4	10750	500	21000
8	3	14250	500	28000
12	2	20325	500	40250
24	1	35875	500	71250



Спутниковые системы связи

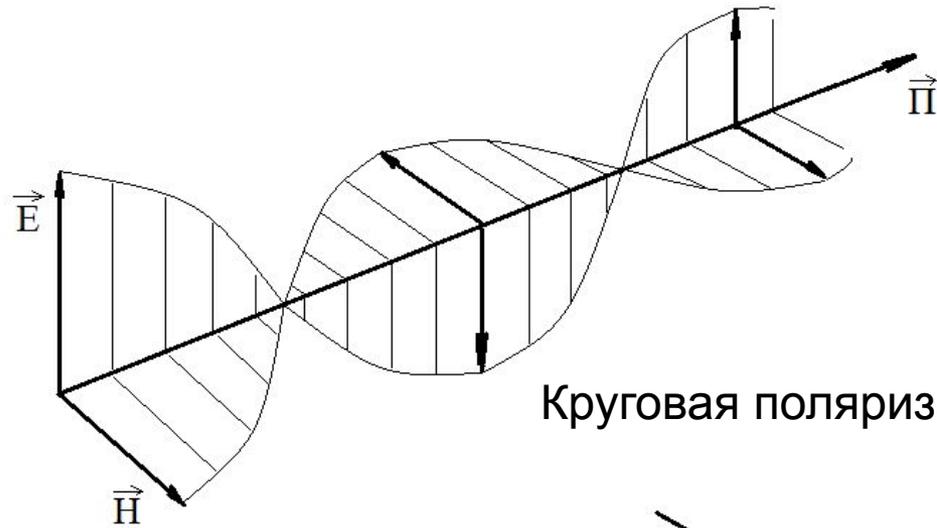
Факторы, влияющие на распространение радиоволн в системах спутниковой связи

1. Потери при распространении радиоволн через ионосферу (через ионосферу проходят волны с частотами выше 30 МГц).
2. Эффект Фарадея (поворот плоскости поляризации волны).
3. Поглощение атмосферными газами и осадками (заметно сказывается на частотах выше 6 ГГц).
4. Эффект Доплера.
5. Запаздывание сигнала при распространении на трассе (может достигать 300 мс для геостационарных ИСЗ).



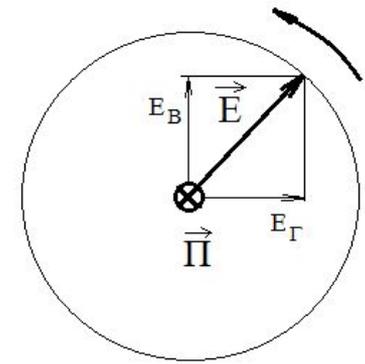
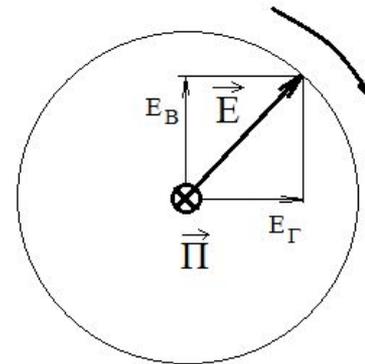
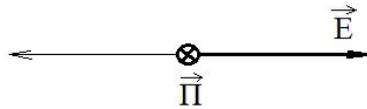
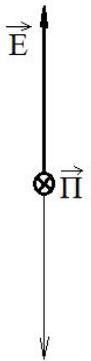
Спутниковые системы связи

Поляризация электромагнитных волн



Линейная поляризация

Круговая поляризация



Вертикальная

Горизонтальная

Правая

Левая

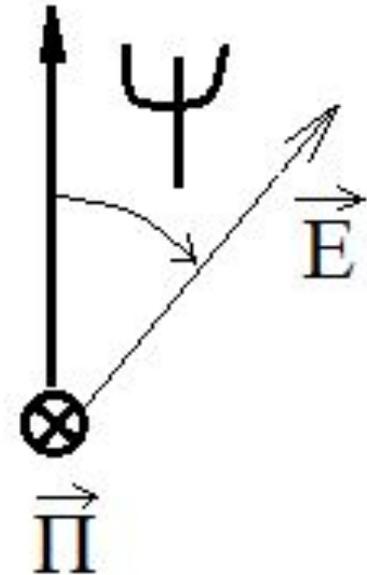
Эффект Фарадея

При распространении поля в ионосфере Земли возникает поворот плоскости поляризации.

Угол поворота зависит от

- 1) частоты;
- 2) протяженности трассы распространения;
- 3) угла входа электромагнитной волны в ионосферу;
- 4) угла между направлением распространения волны и направлением силовых линий магнитного поля Земли.

Для исключения влияния эффекта Фарадея используют антенны, работающие на круговой поляризации.





Эффект Доплера

Частота изменяется на величину

$$\Delta f \approx f_0 V \cos \psi / c,$$

где f_0 – несущая частота, на которой работает передатчик;

$V \cos \psi$ – радиальная составляющая скорости передатчика относительно приемника;

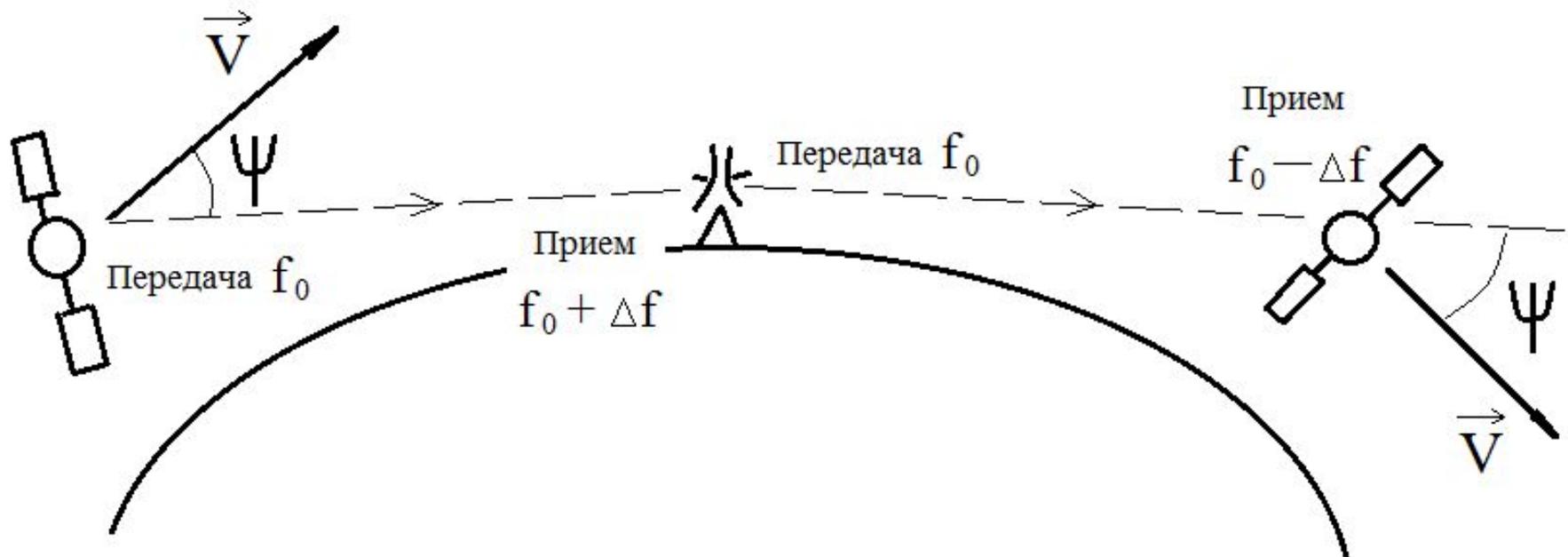
c – скорость света.

Для **круговых орбит** максимальный относительный доплеровский сдвиг частоты можно приближенно определить из соотношения

$$\Delta f / f_0 \approx \pm 1,5 \cdot 10^{-6} N,$$

где N – число оборотов ИСЗ вокруг Земли за сутки.

Образование доплеровского сдвига





Спутниковые системы связи

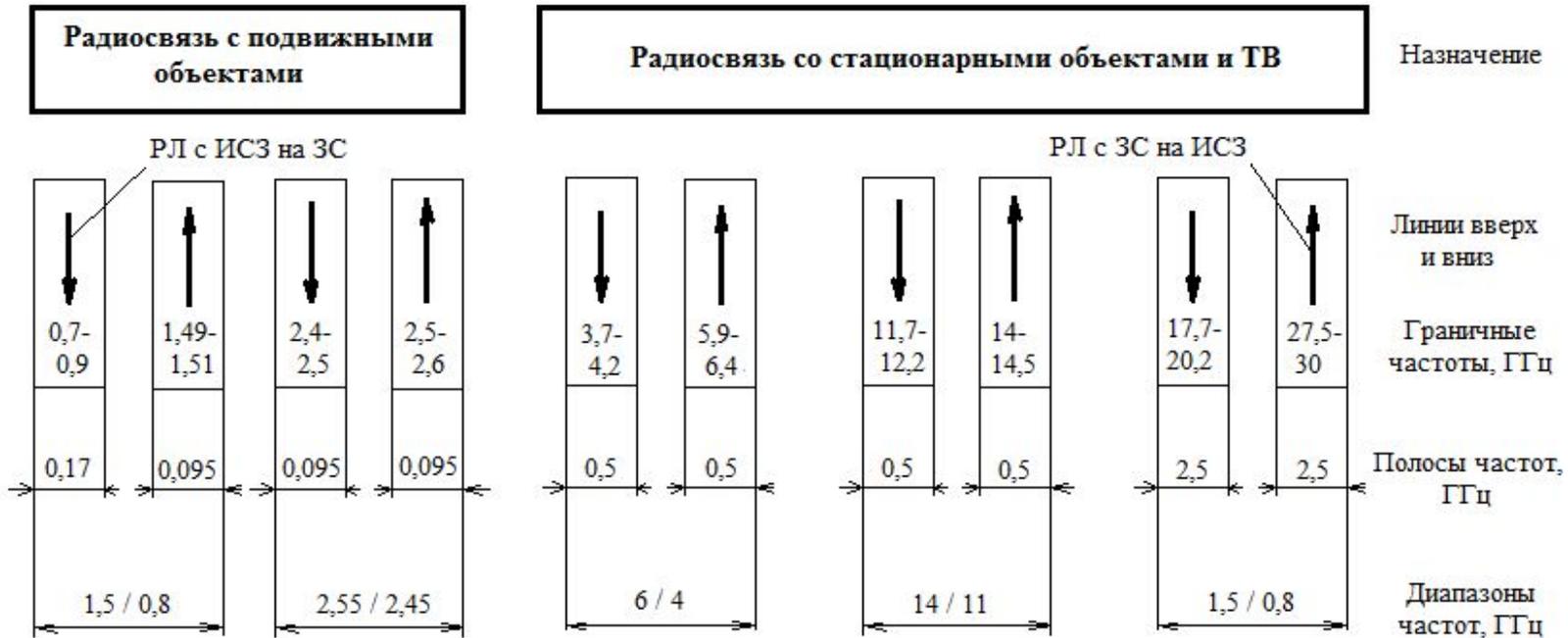
Диапазоны частот спутниковых линий связи

Частота радиоволн, ГГц	Поглощение, дБ, при углах места свыше 10 градусов			Эффект Фарадея, градусы	Эффект Доплера, %
	в тропосфере	в гидрометеорах	в ионосфере		
0,3	—	—	0,1	600	0,7
1	—	—	0,02	60	0,1
3	0,015	0,05	—	8	0,02
6	1	1,3	—	3	—
10	1,7	8	—	1	—
20	3	18	—	0,5	—



Спутниковые системы связи

Распределение частот для ССС



P-диапазон: 225 ... 400 МГц

L-диапазон: 1 ... 2 ГГц

S-диапазон: 2 ... 4 ГГц

C-диапазон: 4 ... 8 ГГц

X-диапазон: 8 ... 12,5 ГГц

Ku-диапазон: 12,5 ... 18 ГГц

K-диапазон: 18 ... 26,5 ГГц

Ka-диапазон: 26,5 ... 40 ГГц



Спутниковые системы связи

Виды модуляции

В общем случае форму сигнала можно описать соотношением:

$$U(t) = U_m \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0),$$

где U_m – амплитуда напряжения сигнала;

f_0 – несущая частота;

φ_0 – начальная фаза сигнала.

Для передачи информации по крайней мере один из параметров сигнала (амплитуда, частота или фаза) должен изменяться по закону передаваемой информации.

В зависимости от этого различают следующие основные виды модуляции:

- 1) амплитудная ($U_m = U_m(t)$);
- 2) частотная ($f_0 = f_0(t)$);
- 3) фазовая ($\varphi_0 = \varphi_0(t)$).



Спутниковые системы связи

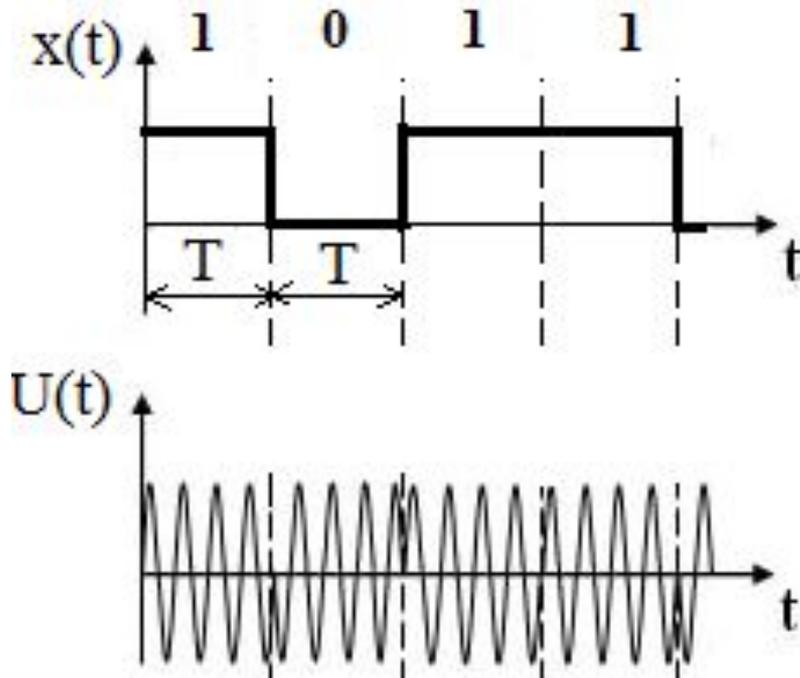
Модуляция в системах спутниковой связи

В системах спутниковой связи наиболее часто используются различные виды **фазовой модуляции (ФМ)**.

Двукратная фазовая модуляция (ФМ-2):

$$U(t) = U_m \cos(2\pi f_0 + X(t) \cdot \pi),$$

где $X(t)$ – сигнал передаваемой информации (принимает значения 0 и 1).



Скорость передачи информации при ФМ-2:

$$R = 1 / T, \text{ бит/с.}$$



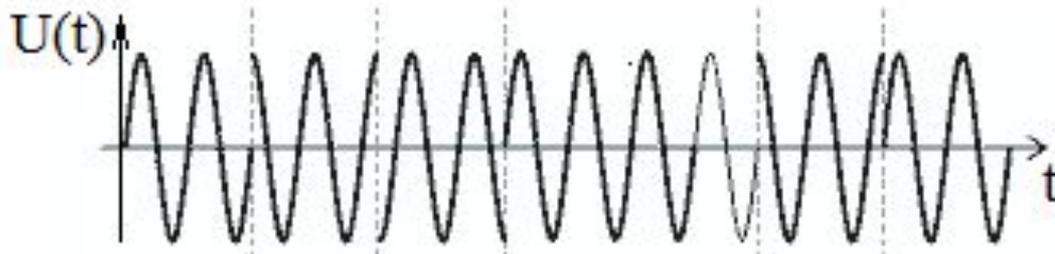
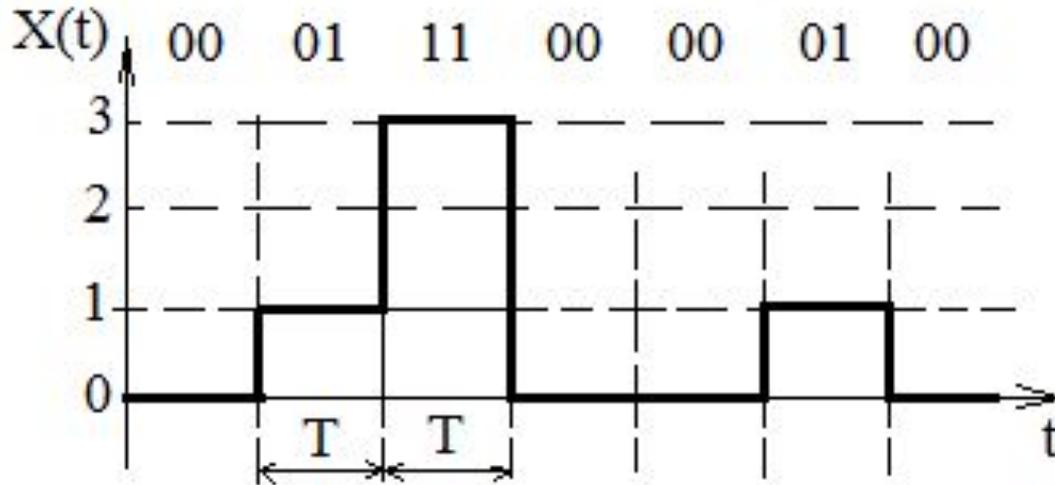
Спутниковые системы связи

Модуляция в системах спутниковой связи

Четырехкратная фазовая модуляция (ФМ-4):

$$U(t) = U_m \cos(2\pi f_0 + X(t) \cdot \pi/2),$$

где $X(t)$ – сигнал передаваемой информации (принимает значения 0, 1, 2, 3).



Скорость передачи информации при ФМ-4:

$$R = 2 / T, \text{ бит/с.}$$



Спутниковые системы связи

Спектр сигнала

Спектр сигнала можно найти, рассчитав **прямое преобразование Фурье** от функции, описывающей зависимость напряжения сигнала от времени:

$$S(2\pi f) = \int_{-\infty}^{\infty} U(t) \exp(-j2\pi f t) dt,$$

где $U(t)$ – зависимость напряжения сигнала от времени;

f – частота;

t – время.

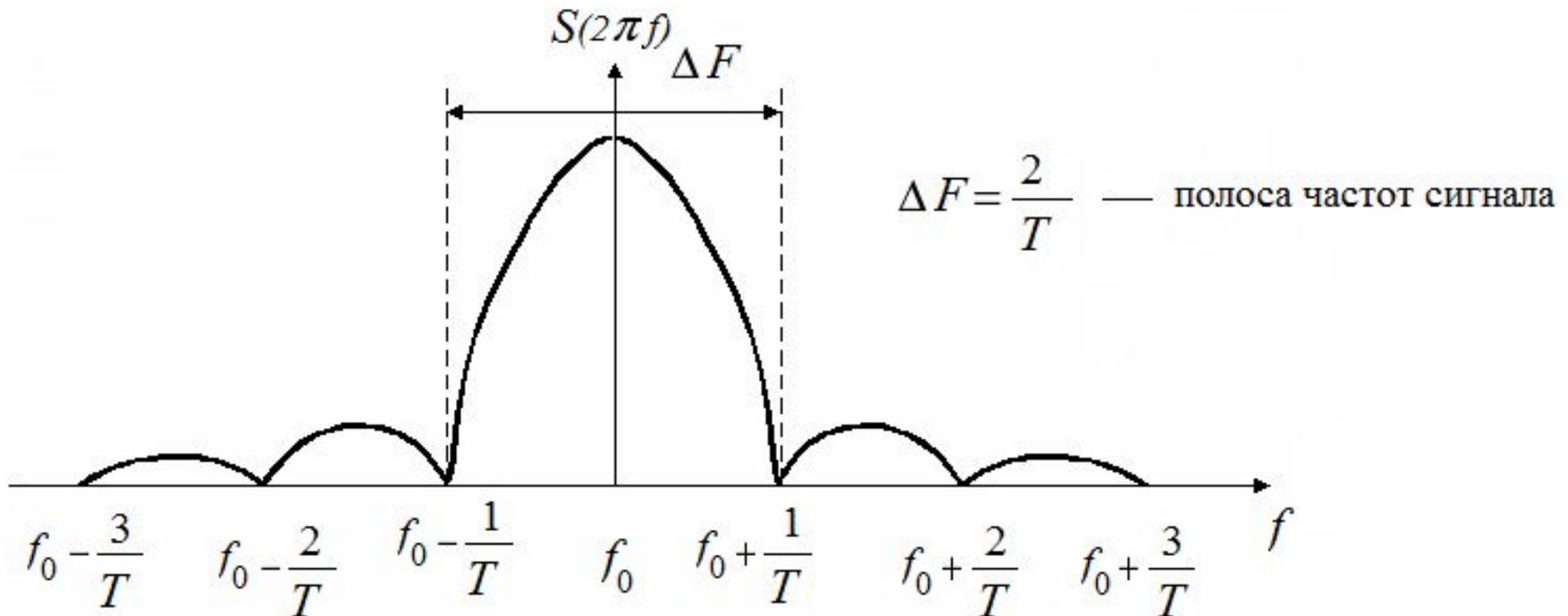
Форму сигнала во временной области, напротив, можно найти, взяв **обратное преобразование Фурье** от спектра сигнала:

$$U(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(2\pi f) \exp(j2\pi f t) df.$$



Спутниковые системы связи

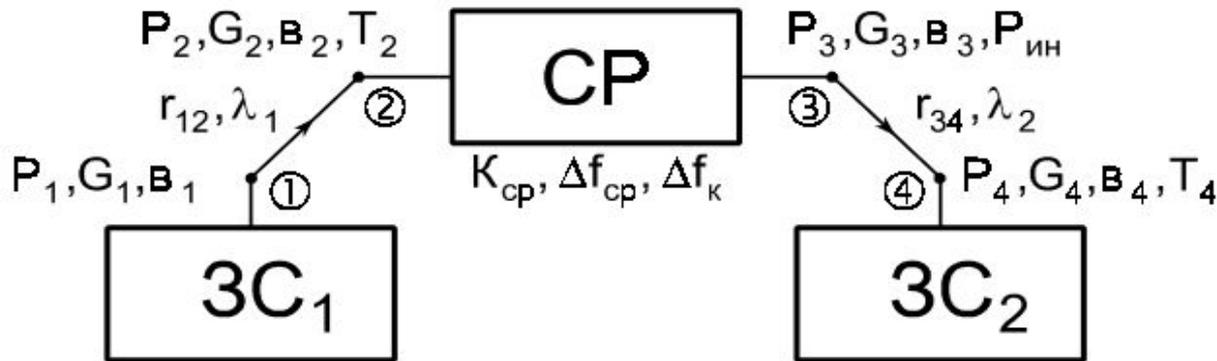
Спектр сигнала с фазовой модуляцией





Спутниковые системы связи

Расчет энергетического бюджета линии радиосвязи



P_1, G_1, B_1 — соответственно мощность передатчика, усиление передающей антенны и потери в тракте ЗС1;

P_2, G_2, B_2, T_2 — соответственно мощность сигнала на входе СР, усиление приемной антенны и потери в антенном тракте СР, шумовая температура СР;

$P_3, G_3, B_3, P_{ин}$ — соответственно мощность сигнала на выходе СР, усиление передающей антенны и потери в тракте СР, мощность интермодуляционной помехи на выходе СР;

P_4, G_4, B_4, T_4 — соответственно мощность сигнала на входе приемника ЗС, усиление приемной антенны ЗС2, потери в антенном тракте и шумовая температура приемника ЗС2;

$K_{CP}, \Delta f_{CP}, \Delta f_k$ — соответственно коэффициент передачи СР по мощности в нелинейном режиме, ширина рабочего частотного диапазона СР и полоса пропускания одного канала СР;

$r_{12}, r_{34}, \lambda_1, \lambda_2$ — соответственно расстояние на интервалах ЗС1-СР и СР-ЗС2, рабочие длины волн передачи ЗС1 и приема ЗС2.



Спутниковые системы связи

Расчет энергетического бюджета линии радиосвязи

Мощность сигнала на входе приемника СР:

$$P_2 = \frac{P_1 G_1 G_2 \Delta_2}{b_1 b_2 L_{12}}, \quad L_{12} = \left(\frac{4\pi r_{12}}{\lambda_1} \right)^2 \Delta L_{12},$$

где Δ_2 — ослабление усиления приемной антенны СР за счет неточной ориентации ее оси симметрии в направлении на ЗС1; L_{12} — ослабление сигнала на участке «ЗС1-СР»; ΔL_{12} — дополнительное ослабление сигнала на участке «ЗС1-СР» за счет неидеальности эфира; λ_1 — рабочая длина волны передачи информации ЗС1.

Мощность шума на входе СР: $P_{ШСР} = kT_2 \Delta f_K < P_2, \quad \frac{P_2}{P_{ШСР}} = 10 \dots 100,$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ — постоянная Больцмана (Вт/Гц·К);

$\Delta f_K = \frac{1,2R}{\log_2 M}$ — полоса частот канала (Гц);

R — скорость передачи информации (бит/с);

$M = 4$ — кратность манипуляции сигнала ФМ-4.



Спутниковые системы связи

Расчет энергетического бюджета линии радиосвязи

Мощность сигнала на выходе СР:

$$P_3 = K_{CP} P_2.$$

При функционировании СР в многосигнальном режиме мощность одного канала

$$P_3 = \frac{K_I P_M}{n}$$

где P_M — максимальная мощность на выходе СР, функционирующего в многосигнальном режиме, которая меньше максимальной мощности в односигнальном режиме; n — количество сигналов на входе СР; K_I — снижение мощности на выходе СР относительно максимальной для уменьшения интермодуляционных помех. В случае, когда $n > 20$, существует оптимальное значение $K_I = 0,63$.

Мощность сигнала на входе ЗС2:

$$P_4 = \frac{P_3 G_3 G_4 \Delta_3}{b_3 b_4 L_{34}}, \quad L_{34} = \left(\frac{4\pi r_{34}}{\lambda_2} \right)^2 \Delta L_{34},$$

где Δ_3 — ослабление усиления приемной антенны СР за счет неточной ориентации ее оси симметрии в направлении на ЗС2; L_{34} — ослабление сигнала на участке «СР-ЗС2»; ΔL_{34} — дополнительное ослабление сигнала на участке «СР-ЗС2» за счет неидеальности эфира; λ_2 — рабочая длина волны передачи информации СР.



Спутниковые системы связи

Расчет пропускной способности линии радиосвязи

При фиксированных параметрах СР и симметричном характере прямого и обратного каналов, когда

$$r_{12} = r_{34}, \Delta L_{12} = \Delta L_{34}, \text{ а также при } \lambda_1 \approx \lambda_2$$

энергетические параметры ЗС определяются из соотношений

$$P_{п\ зс} = P_1, G_{зс} = G_1 = G_4, P_{пр\ зс} = P_4, T_{зс} = T_4,$$

где $P_{п\ зс}$ — мощность передатчика ЗС; $P_{пр\ зс}$ — реальная чувствительность приемника ЗС; $T_{зс}$ — шумовая температура.

С учетом вышеприведенных соотношений пропускная способность ССС с подвижными объектами при организации ряда параллельных каналов «точка—точка» определяется следующим образом

$$n_k = \frac{2K_{и} P_M G_3 G_{зс} \Delta_3 \lambda_2^2 \log_2 M}{380 b_3 b_4 r_{34}^2 \Delta L_{34} k R b [\text{arc}\Phi(1 - P_{ош})]^2 T_{зс}},$$

где n_k — максимально допустимое число дуплексных каналов, организованных через данный СР; $b = 1,1 \dots 1,3$; $\text{arc} Z$ — функция, обратная

от Z ; $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ — интеграл вероятности; $P_{ош}$ — вероятность ошибки.

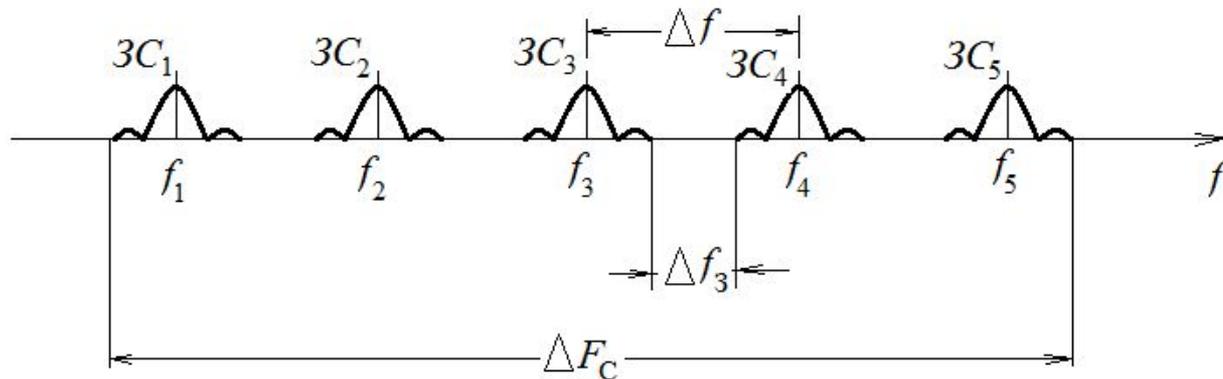


Спутниковые системы связи

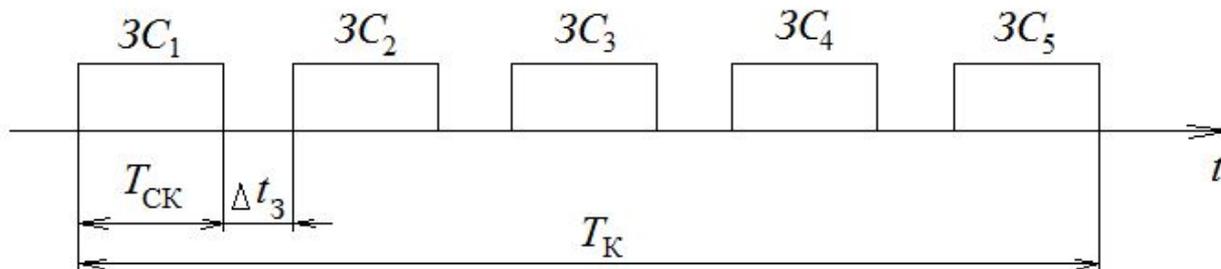
Организация многостанционного доступа

Различают следующие виды многостанционного доступа:

- 1) многостанционный доступ с **частотным разделением** каналов (МДЧР, FDMA);



- 2) многостанционный доступ с **временным разделением** каналов (МДВР, TDMA);



- 3) многостанционный доступ с **кодовым разделением** каналов (МДКР, CDMA).



Спутниковые системы связи

Многостанционный доступ с частотным разделением

Результирующая скорость передачи информации при частотном разделении сигналов ЗС

$$R = \sum R_i,$$

где R_i – скорость передачи (бит/с) i -й ЗС.

Используется во многих действующих системах связи, как правило, наряду с другими видами разделения сигналов.

В некоторых системах (Inmarsat, «Интерспутник») изначально использовался как основной вид разделения сигналов.

Достоинство:

сравнительная простота оборудования;

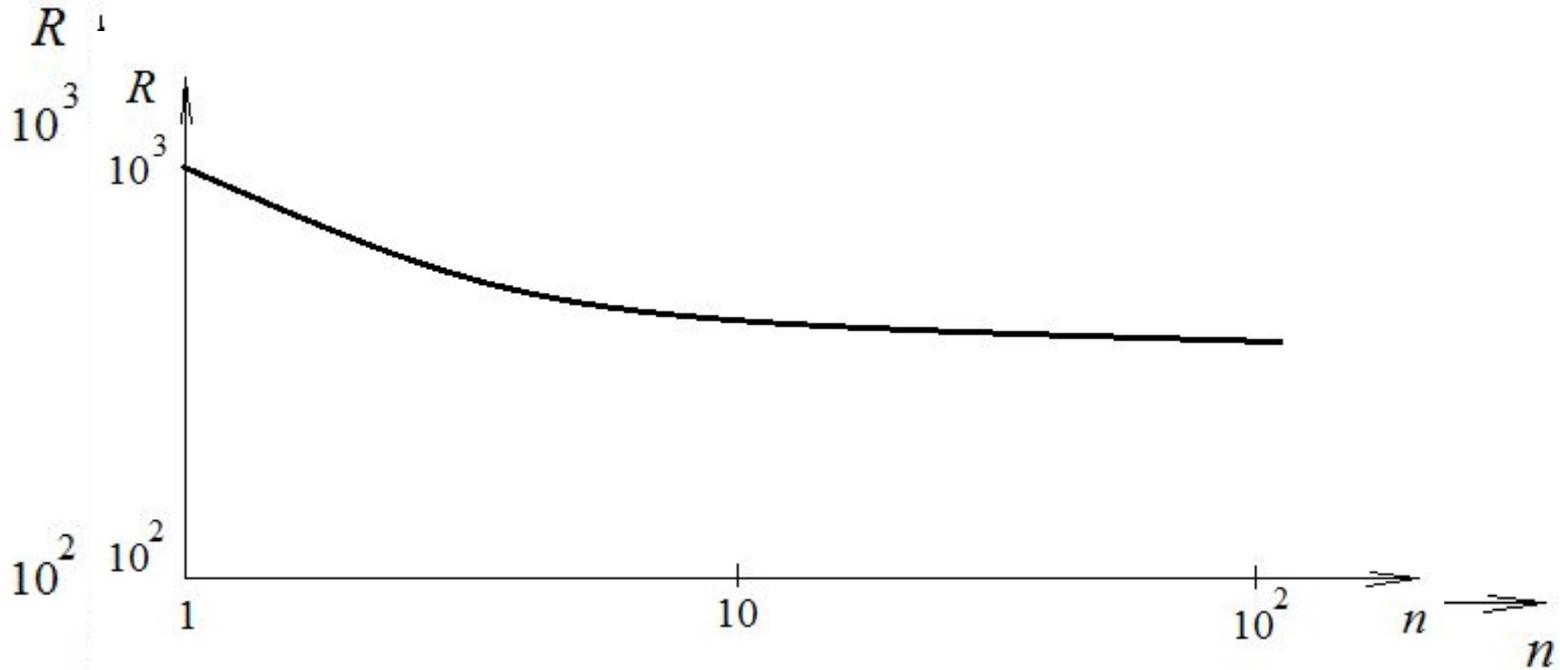
Недостатки:

- потеря выходной мощности ретранслятора в многоканальном режиме по сравнению с односигнальным (на 25 ... 37 %);
- эффект подавления слабого сигнала сильным;
- комбинационные помехи (взаимные искажения сигналов различных ЗС в процессе их одновременной обработки в ретрансляторе);
- недоиспользование энергетического потенциала радиолинии.



Спутниковые системы связи

Зависимость пропускной способности ретранслятора при частотном разделении от числа сигналов



Здесь n – число сигналов; R – максимально возможная суммарная скорость передачи (бит/с).



Спутниковые системы связи

Многостанционный доступ с временным разделением

Эффективность использования времени работы ретранслятора определяется необходимостью введения защитных интервалов между субкадрами

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n T_{CKi}}{T_K},$$

где T_{CKi} – временной интервал, используемый для передачи собственно информационного сигнала в i -м пакете; n – число пакетов; T_K – длительность кадра.

В существующих и разрабатываемых системах $\eta > 0,9$.

Достоинства:

отсутствуют недостатки, присущие системам с МДЧР.

Недостатки:

необходима синхронизация работы ЗС.

Система спутниковой связи «Гонец»

Технические характеристики	«АТ-М» мобильный малогабар.	«АТ-С» стационарный	«ЭТ» экологический	«РС» региональная станция
Диапазон частот, МГц	З-К: 312...315; К-З: 387...390	З-К: 312...315; К-З: 387...390	З-К: 312...315; К-З: 387...390	З-К: 1642,5...1643,5; К-З: 1541...1541,9
Скорость передачи, Кбит/с	4,8	9,6	4,8	64,0
Мощность передатчика, Вт	10	10	10	10
Шумовая температура, К	200	200	200	150
АФУ	Встроенное или выносное (штырь длиной до 0,5 м)	Выносное, диаметр 0,8 м	Встроенное (штырь длиной до 0,5 м)	Выносное
Вид модуляции	ФМ-2	ФМ-2	ФМ-2	ФМ-4
Вероятность ошибки на бит	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}
Доступ абонентов	Прямой, ЧРК/ВРК, ПКТ	Прямой, ЧРК/ВРК, ПКТ	Автомат.	Через наземные линии связи, ЧРК/ВРК, ПКТ
Ввод-вывод информации	ПК типа IBM PC-AT, RS 232	ПК типа IBM PC-AT, RS 232		ПК типа IBM PC-AT, RS 232
Масса, кг	3	10...15	10	60
Питание	Аккумулятор. батареи или сеть переменного тока	Аккумулятор. батареи или сеть переменного тока	Аккумулятор. батареи	Сеть переменного тока



Спутниковые системы связи

Спутник системы связи «Гонец»



КА «Гонец-Д1»



КА «Гонец-М»



Спутниковые системы связи

Абонентский терминал системы связи «Гонец»





Спутниковые системы связи

Система спутниковой связи Iridium

Технические характеристики	АТ (портативный)
Диапазон частот, МГц	1616...1626,5
Скорость передачи, Кбит/с – речь – данные	4,8 2,4
Мощность передатчика, Вт	0,6
ЭИИМ, дБ·Вт	1,4
Добротность G/T , дБ/К	-23,8
Доступ абонентов	ЧРК/ВРК, ПКТ
Вид модуляции	ФМ-4
Вероятность ошибки на бит	$10^{-4} \dots 10^{-5}$
АФУ	штырь длиной 8 см
Ввод-вывод информации	ПК типа IBM PC-AT, RS 232
Масса, кг	0,65
Питание	Аккумуляторные батареи или сеть переменного тока

Спутник системы связи Iridium



Фазированная антенная решётка имеет 48 лепестков формирующих 16 лучей в трех секторах. Четыре межспутниковые антенны обеспечивают пропускную способность 10 Мбит/с для каждого аппарата.

Каждый спутник может поддерживать до 1100 телефонных соединений и весит около 680 кг



Спасибо за внимание

Роман Станиславович Комягин, доцент кафедры РЛ1 МГТУ им. Баумана

Кафедра SM-1 «Космические аппараты и ракеты-носители»
107005, Москва, Госпитальный переулок, дом 10

E-mail: kafsm1@sm.bmstu.ru

Телефон: +74992610107