# Лекция 5

# Множественный доступ в системах радиосвязи

Большинство современных систем радиосвязи является **системами множественного доступа**. Это означает, что по одному физическому радиоканалу можно осуществлять одновременную передачу нескольких сообщений. Для этого формируется ***групповой сигнал*** $S_{гр}(t)$, который является функцией множества источников сообщений $x_i(t)$:

$$S_{гр}(t) = S\{s_1(t),\ s_2(t),\ldots,\ s_i(t)\}$$

**Системы множественного доступа**

**многоканальные**

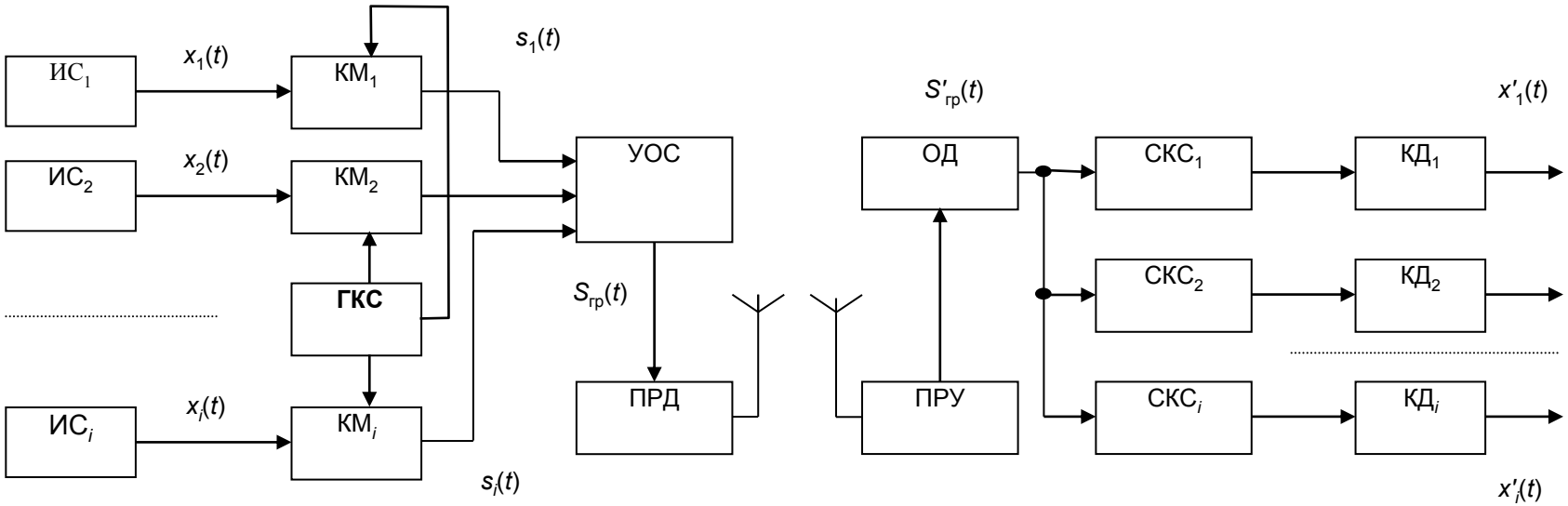
групповой сигнал формируется при помощи специального устройства объединения до попадания сигналов в канал распространения

**многостанционные**

групповой сигнал формируется непосредственно в канале распространения, т.е. на входе приемных устройств

# Структурная схема многоканальной системы (МКС)

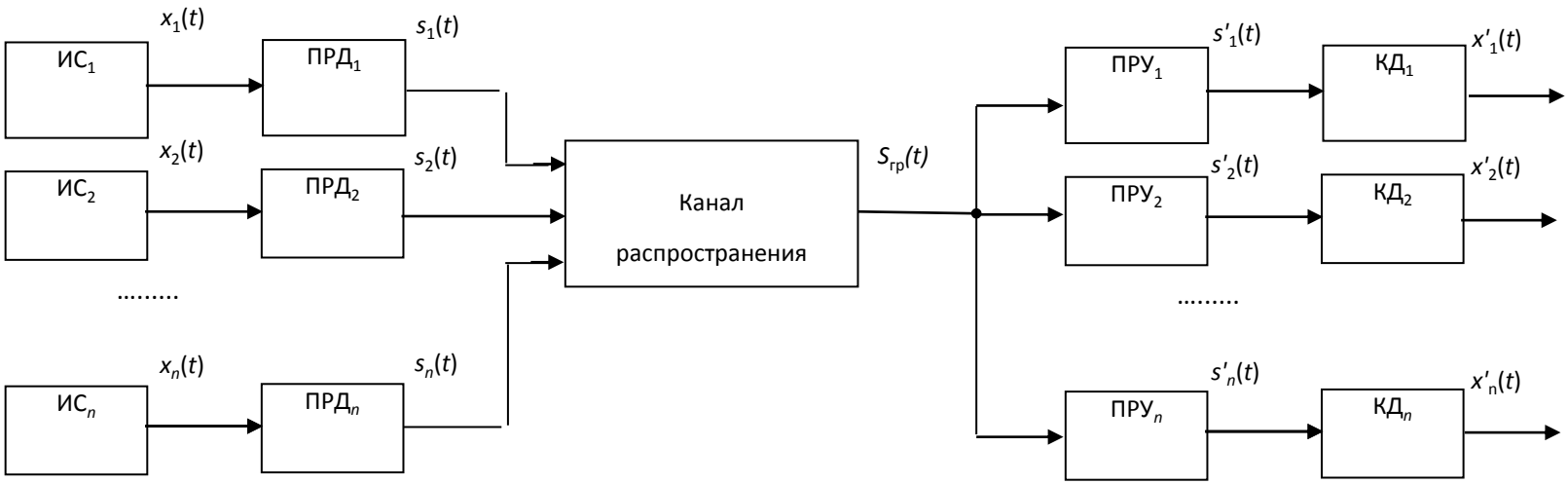





Сообщения $x_1(t)$, $x_2(t)$,…, $x_i(t)$, формируемые разными источниками сигналов, поступают на канальные модуляторы (КМ), которые модулируют канальные несущие, производимые генератором канальных сигналов (ГКС). Модулированные канальные сигналы поступают на устройство объединения (УО), где формируется групповой сигнал $S_{гр}$(t). В передатчике (ПРД) осуществляется модуляция несущей частоты групповым сигналом. В приемном устройстве (ПРУ) после предварительной обработки (фильтрация, усиление и т. п.) производится демодуляция принятого сигнала и выделение оценки группового сигнала в общем демодулятора (ОД). Селекторы канальных сигналов (СКС) выделяют оценки канальных сигналов $s'_i(t)$, после чего в канальных детекторах формируются оценки принятых сообщений $x'_i(t)$.

# Структурная схема многостанционной системы (МСС)






**Особенность МСС:** доступ корреспондентов осуществляется в общий частотный канал, при этом они передают (и принимают) информацию независимо друг от друга тогда, когда в этом возникает необходимость.

В состав МСС обычно входит N корреспондентов, каждый из которых является источником дискретной или непрерывной информации. Сообщение каждого корреспондента $x_i(t)$ в передатчике преобразуется в сигнал $s_i(t)$. В результате сложения радиосигналов корреспондентов непосредственно в канале распространения формируется групповой сигнал $S_{гр}$(t). В приемных устройствах производится выделение канальных сигналов из группового, а на выходе канальных детекторов формируются оценки исходных сообщений.

# Условия линейной независимости сигналов



Преобразование первичного сигнала в канальный сигнал: $s_i(t) = S_i\left[x_i(t),\ \psi_i(t)\right]$

$\Psi_i(t)$ – сигнал несущей частоты.

Если первичный сигнал слабо меняется на интервале времени, равном периоду сигнала-носителя, т. е. $x_i(t) \approx x_i$, то $s_i(t) = x_i \cdot \psi_i(t)$, и групповой сигнал может быть записан в виде:

$$S_{гр}(t) = \sum_{k=1}^{N} x_k \cdot \psi_k(t) = x_1 \cdot \psi_1(t) + x_2 \cdot \psi_2(t) + \ldots + x_N \cdot \psi_N(t)$$

В аддитивных линейных системах оператор разделения является линейным, поэтому можно записать равенство:

$$Y_i\left[S_{гр}(t)\right] = \sum_{k=1}^{N} Y_i\left[x_k \cdot \psi_k(t)\right] = \sum_{i=1}^{N} Y_i\left[s_i(t)\right]$$

и условие эффективного разделения канальных сигналов приобретает вид:

$$Y_i\left[S_{гр}(t)\right] = \sum_{k=1}^{N} Y_i\left[x_k \cdot \psi_k(t)\right] = \sum_{i=1}^{N} Y_i\left[s_i(t)\right] = \begin{cases} s_i(t), & i = k, \\ 0, & i \neq k. \end{cases}$$

Канальные сигналы $s_i(t) = x_i \cdot \psi_i(t)$ будут линейно независимыми, если не существуют ненулевые коэффициенты $x_1, x_2, \ldots, x_N$, для которых

$$x_k \cdot \psi_1(t) + x_2 \cdot \psi_2(t) + \ldots + x_N \cdot \psi_N(t) \equiv 0$$

Для обеспечения независимости функций $\psi_1, \psi_2, \ldots, \psi_N$ необходимо и достаточно, чтобы был отличен от нуля определитель матрицы Грама:

$$\left\| a_{ij} \right\| = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \ldots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \ldots & a_{2N} \\ a_{N1} & a_{N2} & \ldots & a_{NN} \end{pmatrix} \neq 0, \quad \text{где} \quad a_{ij} = \int_0^T \psi_i(t)\psi_j(t)dt$$

**Условие ортогональности функций :** $$\frac{1}{T}\int_0^T p(t)\psi_i(t)\,\psi_j(t)dt = \begin{cases} k^2, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$$

k – постоянная величина, пропорциональная среднеквадратическому значению или средней мощности сигнала;

p(t) – положительная весовая функция, не зависящая от индексов i и j.

**Условие ортогональности сигналов**

**во временной области**

$$\frac{1}{E}\int_0^T s_i(t)\,s_j(t)dt = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j, \end{cases}$$

**в частотной области**

$$\frac{1}{E}\int_{f_н}^{f_в} S_i(f)\,S_j(f)df = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$$

# Формирование канальных сигналов



Канальные сигналы формируются с помощью специальных сигналов-переносчиков.

**Сигнал-переносчик** (сигнал несущей частоты) – вспомогательное колебание, удовлетворяющее условиям линейной независимости (в частном случае — ортогональности) и преобразующееся в канальный сигнал путем модуляции его абонентским сигналом.

**Типы сигналов-переносчиков**

- **монохроматические** (синусоидальные) → используются в системах с ЧРК
- **импульсные** (простой или сложной формы) → используются в системах с ВРК
- **комбинированные** (объединение монохроматических и импульсных) → используются в системах с КРК или разделением по форме

ЧРК, ВРК, КРК – частотное, временное, кодовое разделение соответственно

# Синусоидальные переносчики



Немодулированное колебание синусоидального переносчика описывается уравнением: $a_i(t) = A_{0i}\sin(\omega_{0i}t + \varphi_{0i})$

В зависимости от того, какой **параметр** синусоидального сигнала-переносчика изменяется под действием информационного сигнала, выделяют различные виды модуляции.

| **амплитуда** | **частота** | **фаза** |
|---|---|---|
| **амплитудная модуляция (АМ)** | **частотная модуляция (ЧМ)** | **фазовая модуляция (ФМ)** |
| $A_i(t) = A_{0i}(1 + m_i a_i(t))$<br>$\omega_i = const,\ \varphi_i = const$ | $\omega_i(t) = \omega_{0i}(1 + m_i a_i(t))$<br>$A_i = const,\ \varphi_i = const$ | $\varphi_i(t) = \varphi_{0i}(1 + m_i a_i(t))$<br>$A_i = const,\ \omega_i = const$ |

$m_i$ – коэффициент пропорциональности.

# Импульсные переносчики



**Виды модуляции импульсных последовательностей**

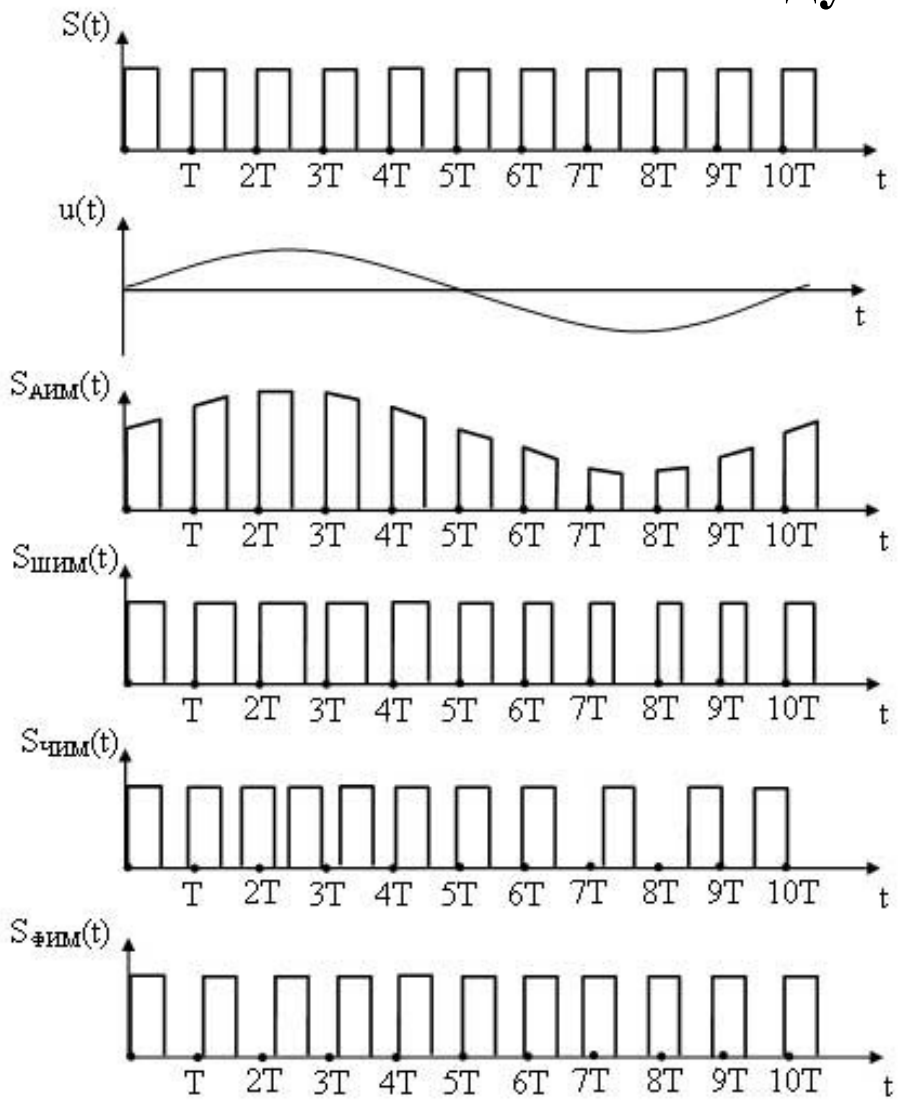
| амплитудно-импульсная (АИМ ) | широтно-импульсная (ШИМ ) | фазо-импульсная (ФИМ ) | импульсно-кодовая (ИКМ ) |
|---|---|---|---|
| ***амплитуда*** импульсов меняется по закону информационного сигнала | ***длительность*** импульсов меняется по закону информационного сигнала | ***положение*** импульсов меняется по закону информационного сигнала | передача ***кодовых комбинаций***, содержащих информацию об амплитуде информационного сигнала |

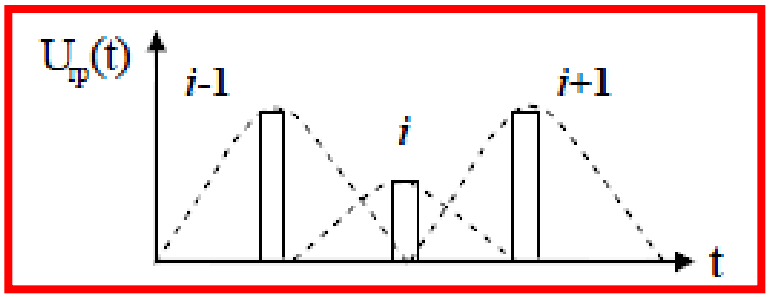
$$U_i(t) = A_0 \cdot r_i(t) \cdot (1 + m_i\, a_i(t))$$
$$T_0 = \text{const},\ \ \tau_i = \text{const}$$

$$\tau_i(t) = \tau_0 \cdot (1 + m_i\, a_i(t))$$
$$T_0 = \text{const},\ \ A_i = \text{const}$$
$$|m_i\, a_i(t)| \le 1$$

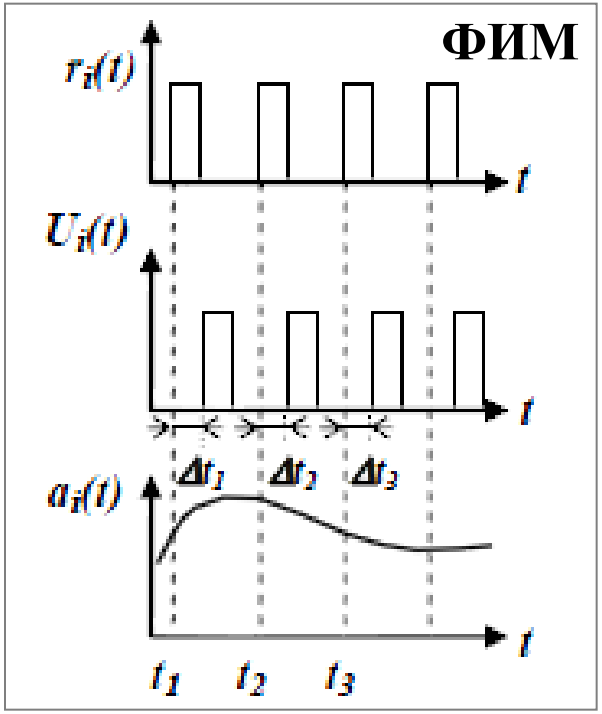
$$\Delta t(t) = \Delta t_i \cdot (1 + m_i\, a_i(t))$$
$$\tau_i = \text{const},\ \ A_i = \text{const}$$
$$|m_i\, a_i(t)| \le 1$$

# Импульсные последовательности при различных видах модуляции



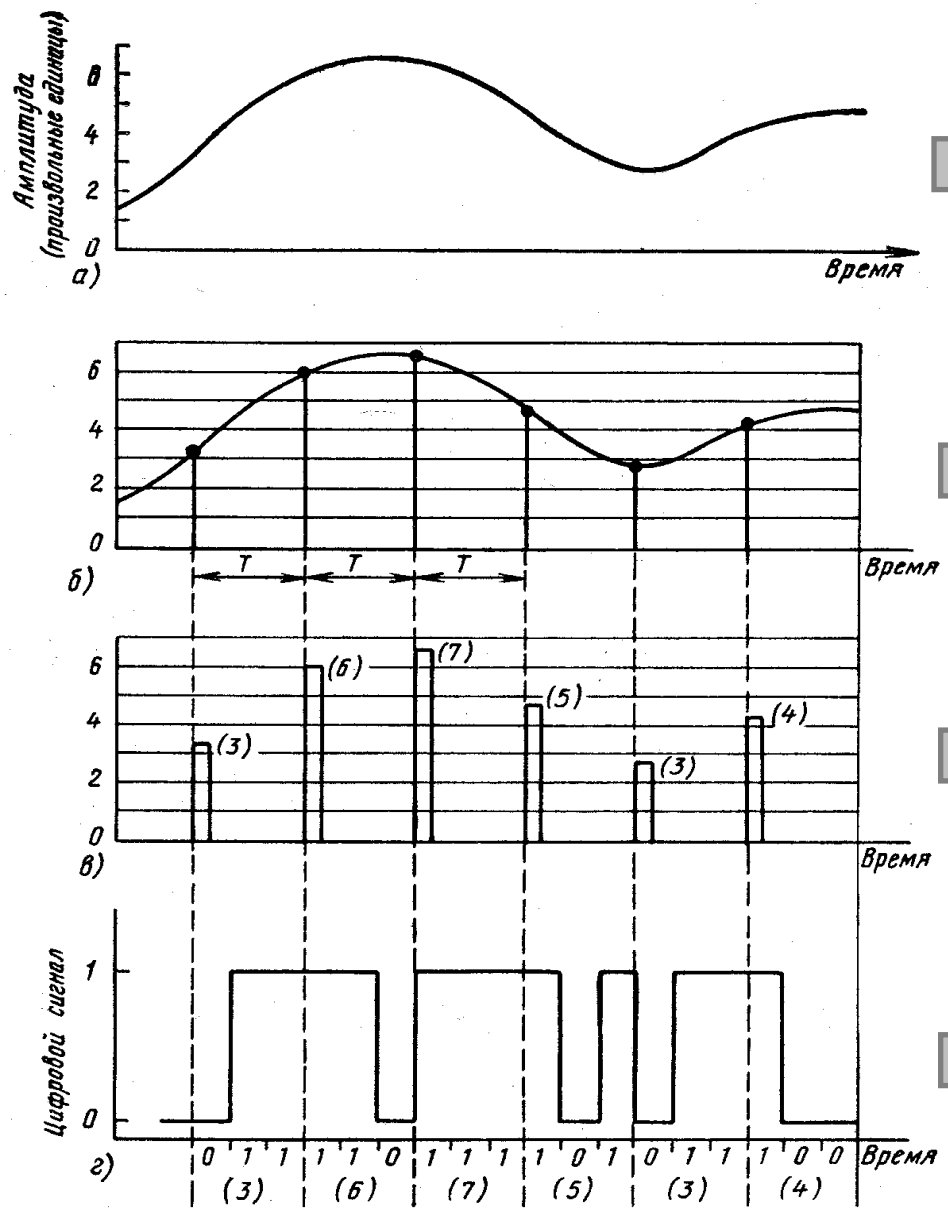

**Уширение формы импульса при ограниченной полосе пропускания группового тракта**




Для устранения межканальных помех необходимы значительные защитные интервалы между импульсами

# Формирование ИКМ-сигнала






**1** → аналоговый сигнал

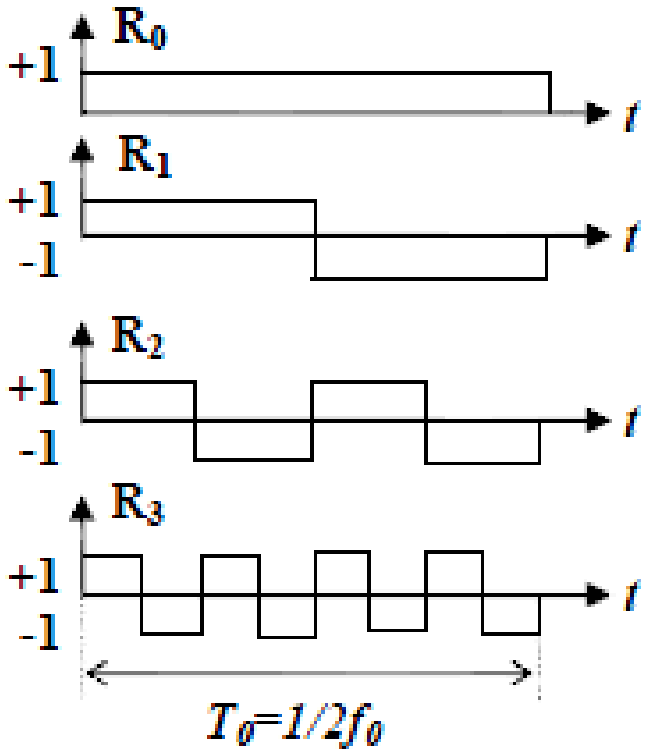
**2** → аналоговый сигнал, ***дискретизируемый*** по времени Т

**3** → дискретизированный сигнал, ***квантуемый*** по амплитуде

**4** → цифровой двоичный сигнал, полученный в результате ***кодирования*** при 3 бит/отсчет

# Импульсно-импульсные переносчики

В роли несущих выступают последовательности импульсов с разными периодами. Эти переносчики строятся на основе «знаковых» функций – **функций Родемахера**: $R_k(f) = \mathrm{sign}\left(\sin(2^k \pi f_0 t)\right),\ k=0,\ 1,\ 2,...$




Функции Родемахера при k=0, 1, 2 и 3

На практике чаще используются **функции Уолша** (Walch), которые строятся по определенным правилам из функций Родемахера:

$$Wal_k(t) = R_k(t),\ k=0,1,2,4$$

$$Wal_3(t) = R_1(t)\cdot R_2(t);\ Wal_5(t) = R_1(t)\cdot R_3(t);$$

$$Wal_6(t) = R_2(t)\cdot R_3(t);\ Wal_7(t) = R_1(t)\cdot R_2(t)\cdot R_3(t)$$

Функции Родемахера и Уолша являются ортогональными по координате t на нтервале $T_0$. Эти переносчики подвергаются амплитудной модуляции или манипуляции, при этом групповой сигнал равен:

$$U_{гр}(t) = \sum_{i=1}^{n} a_i(t)\,Wal_i(t)$$

# Организация многостанционного доступа в системах связи

Множество абонентов I

Непрерывная или дискретная информация

**Адресные** сигналы $s_i(t)$

Не все абоненты одновременно участвуют в сеансе связи, а обращаются к системе по мере необходимости

Системы МСД можно рассматривать как системы *массового обслуживания*, используя **теорию телетрафика**

**1. Активность** абонента $p_a$ **-** вероятность передачи информации в определенный момент времени. Как правило, выполняется условие $p_a \ll$ .

**2. Вероятность активности $I_a$ абонентов в определенный момент времени:**

$$p(I_a) = C_{I_{max}}^{I_a} p_a^{I_a} \left(1 - p_a\right)^{I_{max} - I_a}$$

$C_{I_{max}}^{I_a}$ – число сочетаний из $I_{max}$ по $I_a$ (биномиальный коэффициент)

$$C_{I_{max}}^{I_a} = \frac{I_{max}!}{I_a!\left(I_{max} - I_a\right)!}$$

$I_{max}$ – общее число абонентов.

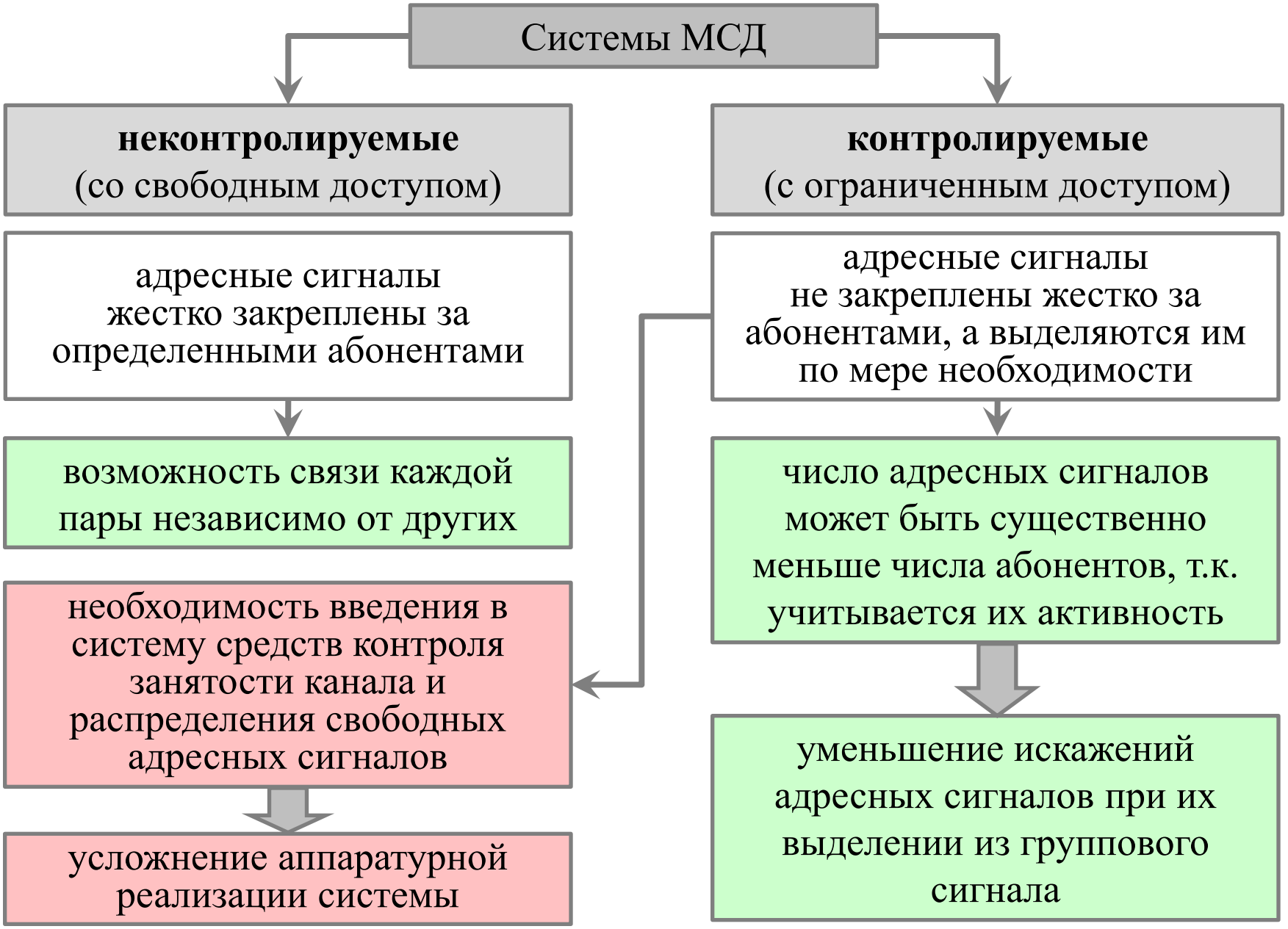
**3. Среднее число активных абонентов :** $I_a = p_a I_{max}$

**4. Трафик (нагрузка) системы** – величина, определяющая продолжительность времени, в течение которого совокупность активных абонентов желает использовать доступ к системе (установить связь с другими абонентами).

$y = I_a T$ T – средняя продолжительность сеанса связи.

# Классификация систем МСД

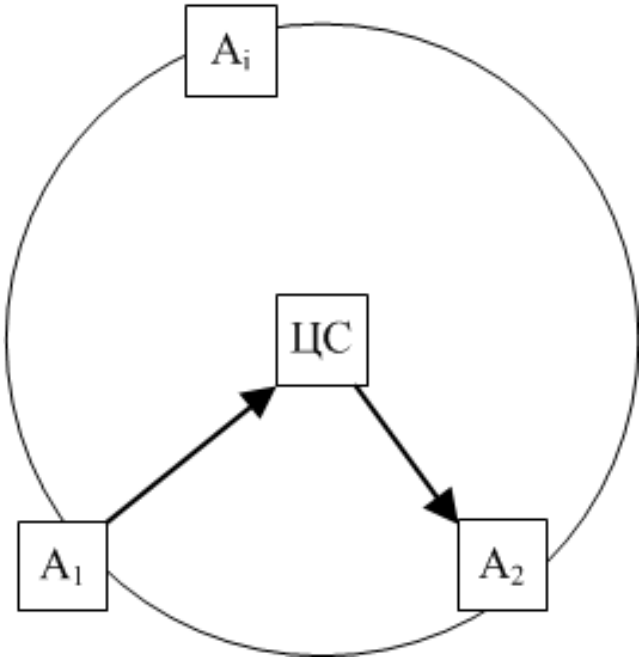




# Системы МСД

## с прямым объединением

абоненты системы могут вести обмен информацией непосредственно друг с другом




Связь в системе с радиальным объединением

## с радиальным объединением

абоненты обмениваются информацией через центральную станцию, где собираются сигналы всех абонентов сети

упрощение реализации контролируемых систем

необходимость обеспечения исключительной надежности функционирования центральной станции

# Системы МСД

| с частотным разделением (МДЧР) | с временным разделением (МДВР) | с кодовым разделением (МДКР) | с пространственным разделением (МДПР) |
|---|---|---|---|
| **Frequency Division Multiple Access (FDMA)** | **Time Division Multiple Access (TDMA)** | **Code Division Multiple Access (CDMA)** | **Space Division Multiple Access (SDMA)** |
| Канальные сигналы разных абонентов имеют разные несущие частоты | Разные канальные сигналы передаются в отдельных временных интервалах | Каждый канальный сигнал имеет свой код | Разделение между абонентами участков пространства (сотовый принцип) за счет использования секторных антенн |

# Протоколы множественного доступа

**с фиксированным доступом**

**Fixed-Assignment Multiple Access (FAMA)**

Пропускная способность распределяется между сигналами разных абонентов статически на основе среднестатистических данных об их активности и остается неизменной в процессе функционирования системы

**с доступом по запросу**

**Demand-Assignment Multiple Access (DAMA)**

В каждом канале создается ряд подканалов, которые выделяются по запросу пользователя; для дуплексной связи между двумя абонентами выделяется пара подканалов, а другим абонентам сообщают об их занятости

**со случайным доступом**

**ALOHA**

P-Aloha (Pure Aloha)
передача пакетов информационных данных в случайные моменты времени без координации между пользователями

S-Aloha (Slotted Aloha)
передача информационных данных в пределах временных слотов, ограниченных синхроимпульсами

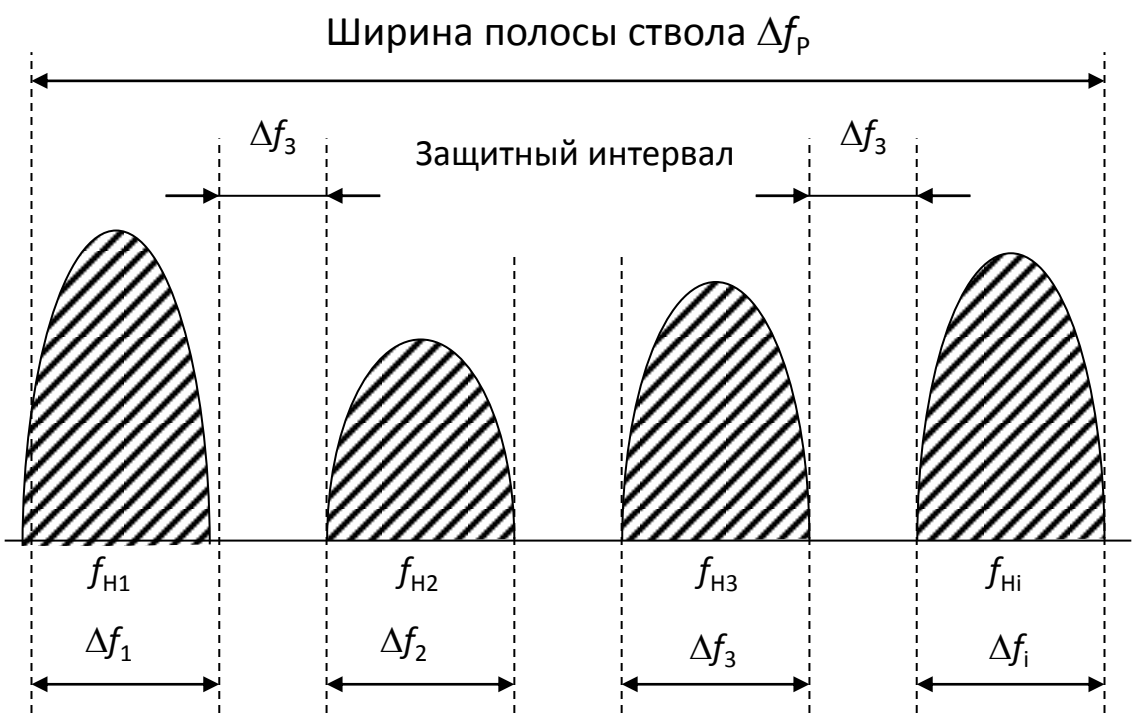
R-Aloha (Reservation Aloha)
временной интервал разбивается на M+1 подинтервалов, последний из которых используется для передачи запросов и резервирования

# МСД с частотным разделением сигналов



Сигналы разных земных станций (ЗС) отличаются несущими частотами и имеют неперекрывающиеся спектры. Модуляция несущей осуществляется либо по частоте, либо по фазе. **Основное правило при выборе модуляции** – обеспечение постоянства огибающей модулированного сигнала.

Все сигналы ЗС передаются одновременно, а групповой сигнал станции приема, например, БРТ спутниковой системы, может быть образован в пределах полосы ствола $\Delta f_р$ в диапазоне СВЧ.




Значения несущих частот и девиации частот сигналов выбирают таким образом, чтобы между спектрами несущих оставались защитные интервалы $\Delta f_з$ для уменьшения взаимного влияния сигналов друг на друга (т.е. уменьшения взаимных помех).

# Преимущества и недостатки МДЧР



| Преимущества | Недостатки |
| --- | --- |
| 1. простота реализации;<br>2. возможность совместимости с другими системами передачи информации;<br>3. отсутствие необходимости синхронизации работы ЗС;<br>4. меньшая мощность передатчика по сравнению с другими видами МСД. | 1. нерациональное использование частотного диапазона при малой активности потребителей;<br>2. трудность обеспечения работы близко расположенных ЗС без значительных межстанционных помех даже при наличии защитных интервалов;<br>3. взаимное подавление сигналов МДЧР<br>4. возникновение нелинейных помех, обусловленных нелинейностью амплитудной характеристики ретранслятора и наличием АМ-ФМ преобразования сигналов. |

# МСД с временным разделением сигналов



Суть МДВР состоит в том, что каждой ЗС для излучения сигналов выделен свой периодически повторяемый интервал времени. Эти интервалы не перекрываются, что обеспечивается взаимной синхронизацией сигналов ЗС во времени.

Интервал времени, в течение которого все станции по одному разу излучают сигнал, образует **кадр**, а интервал времени излучения каждой ЗС (длительность пакета импульсов) является **субкадром**. Каждый кадр МДВР содержит сигнал общей синхронизации, передаваемый центральной станции, который используется всеми остальными ЗС. Субкадр, в свою очередь, состоит из преамбулы и ряда информационных пакетов, предназначенных различным станциям сети.

Преамбула включает в себя защитный временной интервал $t_з$, сигнал восстановления несущей для синхронизации демодулятора и сигнал начала информационного пакета. В преамбуле может содержаться и другая служебная информация.

# Эффективность системы связи с МДВР



Эффективность системы связи с МДВР зависит от того, какая доля времени кадра (цикла) отводится на передачу всевозможной служебной информации и организации защитных временных интервалов. Количественно эффективность может быть оценена следующим соотношением:

$$\eta = 1 - \frac{T_{КС} + (n-1)\,t_з + nT_{СС}}{T_к}$$

$T_{КС}$, $T_{СС}$ – длительности сигналов кадровой и субкадровой синхронизации;
$t_з$ – длительность защитного интервала;
n – число каналов системы.

**Для повышения эффективности необходимо**:

- увеличивать длительность кадра,
- уменьшать длину и число защитных интервалов,
- повышать точность синхронизации.

Следует помнить, что длительность кадров зависит от вида передаваемой информации, поэтому в некоторых случаях для увеличения $T_к$ приходится вводить буферную память, в результате чего возрастает задержка передаваемой информации.

При проектировании МДВР одной из основных проблем является **необходимость обеспечения жесткой синхронизации**, исключающей взаимное влияние сигналов ЗС на входе ретранслятора. **22**

**Синхронизация**

| **на прием** | **на передачу** |
| --- | --- |
| определение временных интервалов, соответствующих субкадрам | удержание сигнала, излучаемого ЗС в рамках выделенного для нее субкадра |
| осуществляется путем детектирования синхросигнала опорной станции | выполняется периферийными станциями путем изменения фазы собственных сигналов в кадре по сравнению с фазой синхросигналов опорной станции |

Синхросигналы всех ЗС передаются в кадре на фиксированных временных позициях отдельно от информационных, что несколько снижает эффективность системы.

# МСД с кодовым разделением сигналов



При МДКР каждая передающая ЗС имеет свой код, позволяющий отличать сигналы друг от друга.

Эффективное различение сигналов по форме, как правило, связано с использованием **широкобазовых сигналов**, т.е. таких сигналов, у которых $\mathbf{B=\Delta f_c T>>1}$ (при том, что у обычных сигналов $B\approx1$).

Такими базами обладают **широкополосные** (составные) сигналы и, в частности, **шумоподобные сигналы** (ШПС), которые, в основном, и применяются в МДКР. **Сигналы различных ЗС** благодаря хорошим корреляционным свойствам ШПС, **различают методами корреляционного приема**.

# Преимущества и недостатки МДКР



| Преимущества | Недостатки |
| --- | --- |
| 1. низкая спектральная плотность излучаемых сигналов;<br>2. высокая помехоустойчивость (особенно по отношениям к узкополосным и импульсным помехам);<br>3. скрытность приемо-передачи сообщений, благодаря использованию специальных кодов. | 1. низкая эффективность использования полосы частот (связанная с тем, что использование ШПС приводит к существенному расширению полосы частот по сравнению с полосой модулирующего сигнала);<br>2. низкая пропускная способность в целом (передача информационных потоков со скоростью не выше, чем 9,6...19,2 кбит/с);<br>3. высокий уровень взаимных помех, ограничивающий число одновременно работающих абонентов (каждая ЗС является, по сути, источником помех для остальных ЗС) и приводящий к усложнению обработки сигналов на приемной стороне |

## Достоверность приема информации в МДКР при идеальной обработке:

$$g^2 = \frac{E_c}{P_ш}$$

$E_c$ – энергия ШПС;

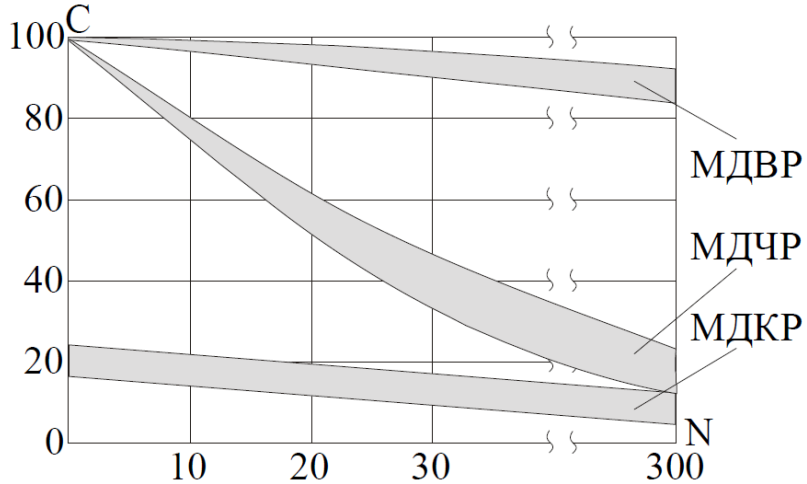
$P_ш$ – спектральная плотность мощности флуктуационной помехи, с учетом влияния N станций

$$P_ш = P_i(N-1)$$

Учитывая то, что $E_{ci} = B_i \cdot P_i$, можно записать следующее выражение для эффективности

$$g^2 = \frac{B_i \cdot P_i}{P_i(N-1)} = \frac{B_i}{N-1}$$

Число абонентов в системе с МДКР не может быть очень большим. Поскольку увеличение этого числа приводит к необходимости существенного увеличения базы ШПС. Реально это число не превышает нескольких десятков.




Сравнительные характеристики пропускной способности систем с МДЧР, МДВР и МДКР в зависимости от числа земных станций. Величина пропускной способности наибольшая для систем с МДВР и наименьшая – для систем с МДКР.