Телекоммуникационные характеристики беспроводных сетей

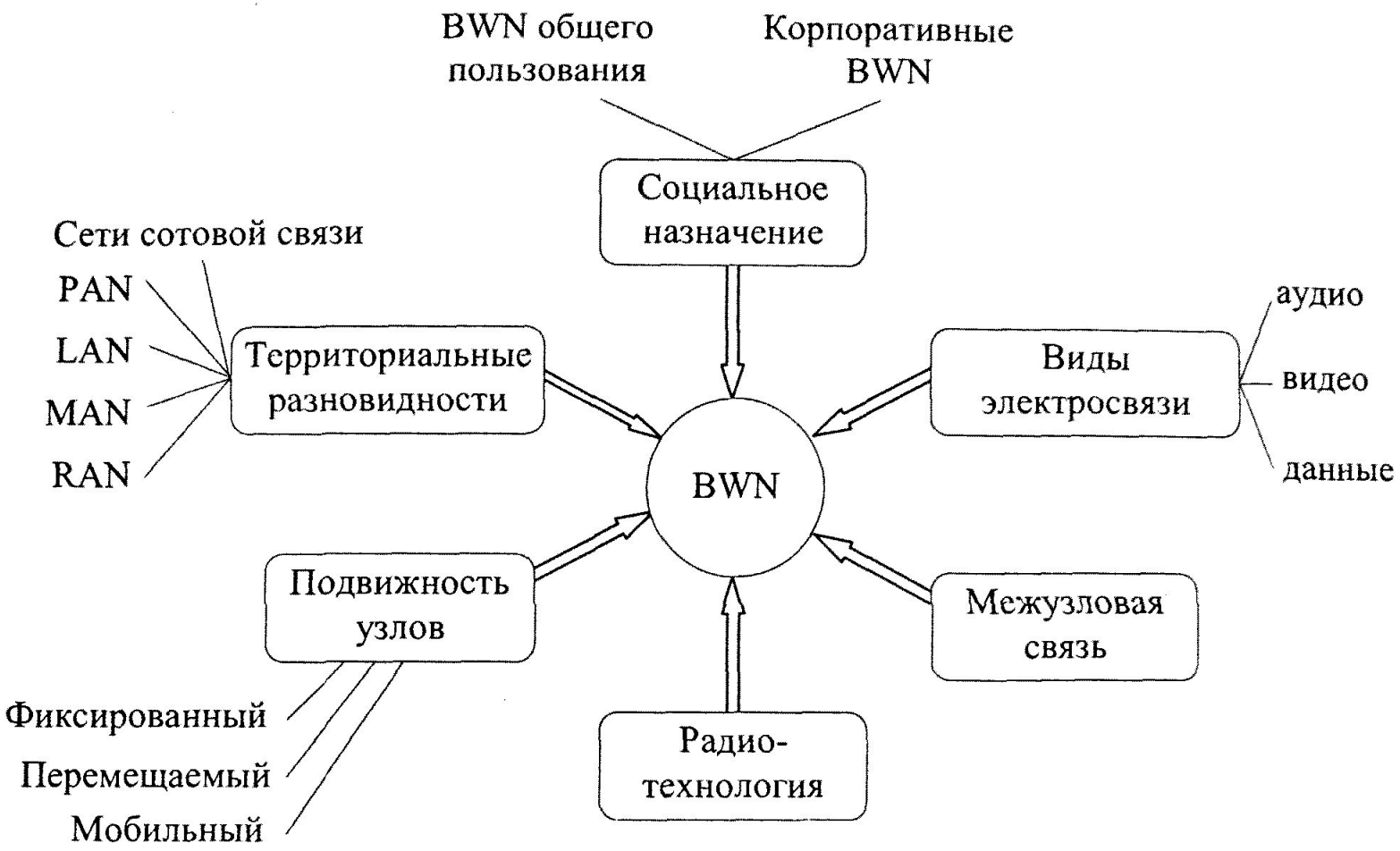


Рис.1 — Классификация беспроводных телекоммуникационных сетей

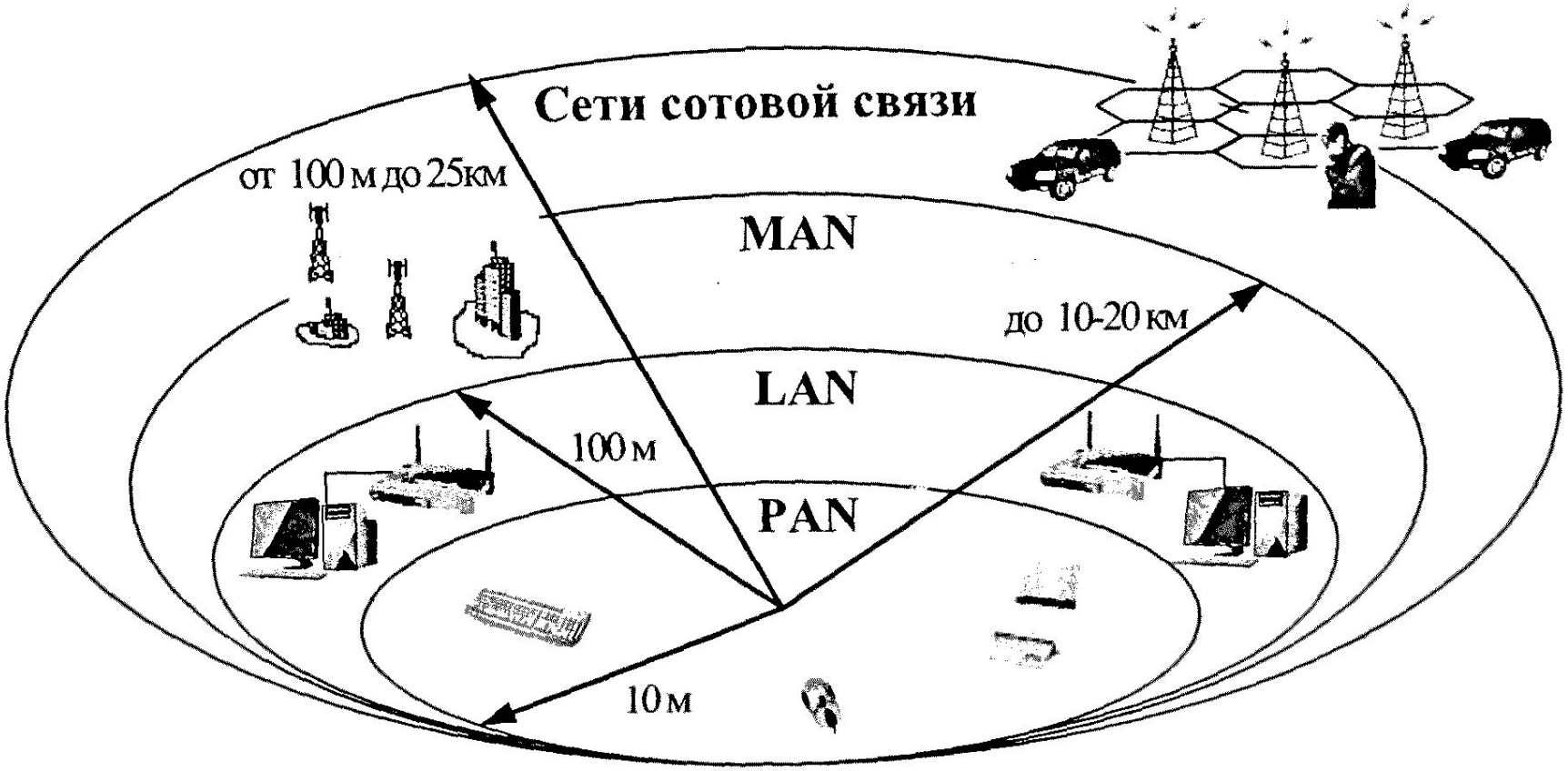


Рис.2 — Вложение телекоммуникационных сетей различного территориального размера

Поскольку связь абонентов, обслуживаемых в разных зонах, обеспечивается с помощью транспортной системы, территориальная непрерывность связи возможна при выполнении двух условий:

во-первых, соседние соты должны частично перекрываться для обеспечения возможности непрерывного приема и передачи радиосигналов в любой точке покрытия сети;

во-вторых, перемещение абонента между сотами должно сопровождаться перекоммутацией/переключением обслуживающих их узлов. За эту процедуру, называемую *хэндовером* (handover/handoff), отвечает система коммутации мобильной связи (Mobile Switching Subsystem – MSS), отсутствующая в сетях фиксированной связи.

Соответственно, сети мобильной связи отличаются от сетей фиксированной связи наличием дополнительных структурных элементов, включаемых между узлами BWN и транспортной сетью.

Связи между узлами сети классифицируются по двум признакам – числу узлов и порядку передачи сообщений между ними. Различают следующие виды связей между узлами:

связь «точка–точка» (point-to-point), обеспечивающая обмен сообщениями между двумя узлами сети с помощью *выделенной линии связи* (другие узлы к этой линии не подключаются, см. рис. 1.4, *а*);

широковещательная (broadcast) связь, при которой сообщение, передаваемое одним узлом, принимается всеми остальными узлами сети посредством использования единого радиочастотного канала (рис. 1.4, *б*);

«многоточечная» (multipoint) связь, обеспечивающая обмен сообщениями между всеми узлами сети посредством использования одного радиочастотного канала (рис. 1.4, *в*);

связь «точка–многоточка» (point-to-multipoint), представляющая собой разновидность многоточечной связи, при которой сообщения передаются между произвольными узлами сети посредством их ретрансляции через центральный узел («вершину») сети (рис. 1.4, *г*).

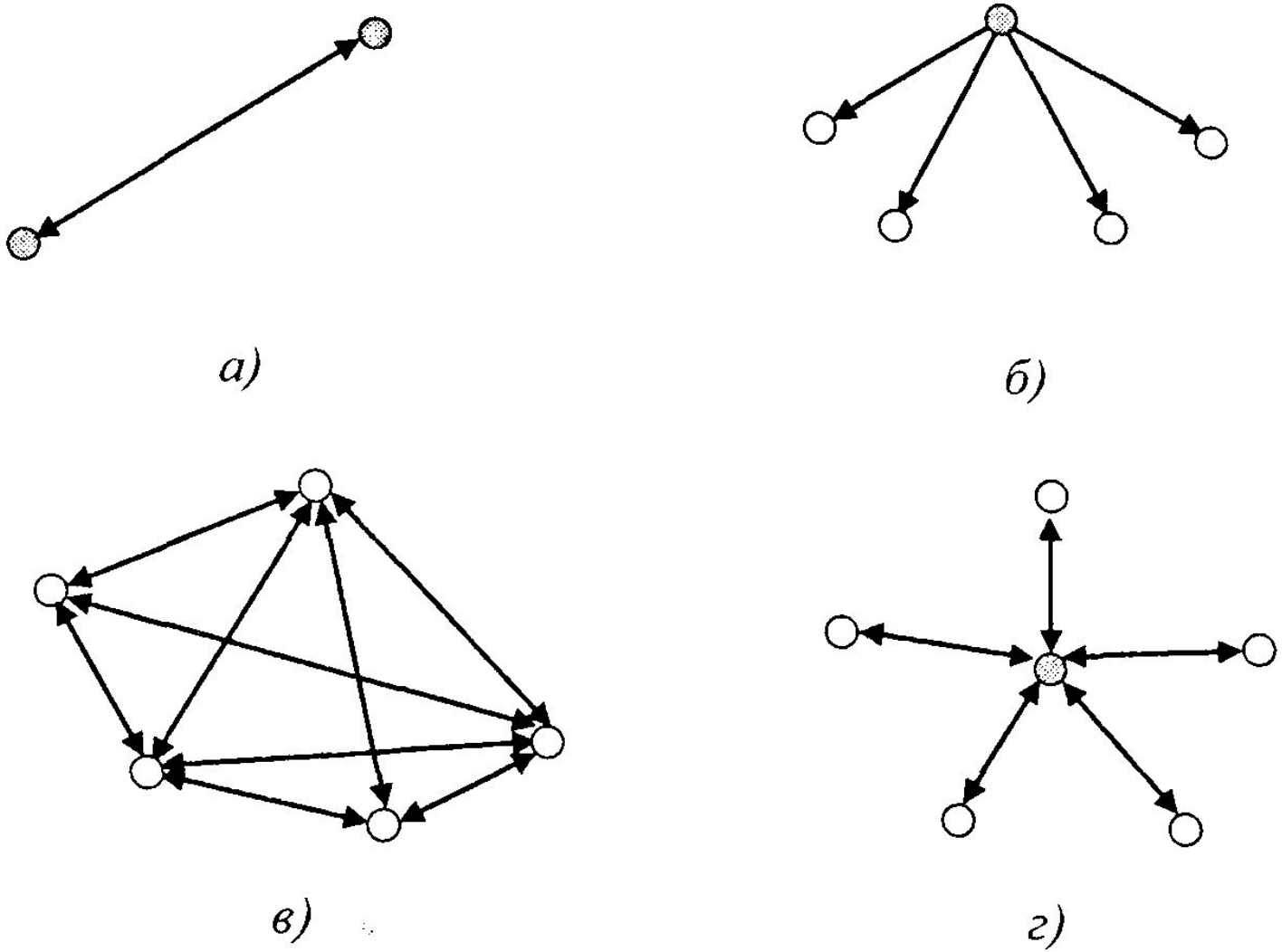


Рис.3 — Классификация топологий сетей

Транспортные сети и их характеристики

Транспортные сети, формирующие проводные каналы связи между удаленными беспроводными сетями, представляют собой совокупность (рис. 1.5):

– *проводных линий связи* (links), по которым передаются цифровые электрические или оптические сигналы;
– *сетевых узлов* (network nodes), осуществляющих ретрансляцию сигналов (включая их мультиплексирование/ демультиплексирование) из одних проводных линий в другие посредством коммутаторов (на рис. 1.5 показана структура транспортной сети, содержащая 9 коммутаторов, соединенных между собой 15-ю линиями связи).

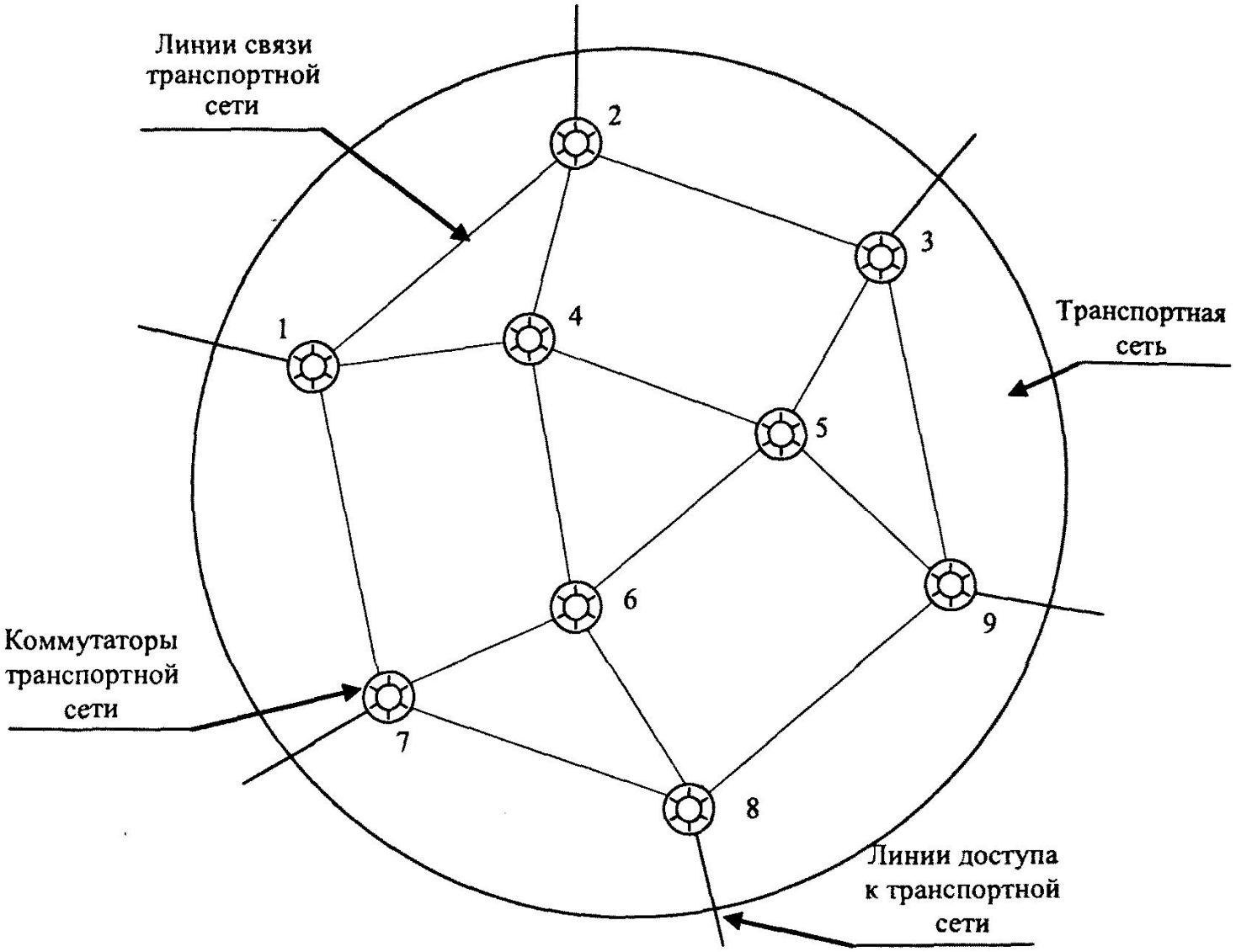


Рис.4 — Структура транспортной сети

1. Иерархический уровень реализации сетей служит основанием для их разделения на две разновидности – первичные и наложенные сети.

Первичные сети (transmission system) обеспечивают физический перенос электрических сигналов от исходного до конечного узла транспортной сети.

Разновидности первичных сетей по способу синхронизации:

- *сети с плезиохронной цифровой иерархией* (Plesiochronous Digital Hierarchy – PDH), в которых мультиплексируемые сигналы близки к синхронным, но не строго синхронны; такие сети обеспечивают скорость передачи цифровых сигналов до 150 Мбит/с;
- *сети с синхронной цифровой иерархией* (Synchronous Digital Hierarchy – SDH), в которых обеспечивается синхронность мультиплексируемых сигналов; такие сети обеспечивают скорость передачи цифровых сигналов до 10 Гбит/с.

Разновидности наложенных сетей:

-коммутируемая телефонная сеть общего пользования (PSTN);
-цифровая сеть с интеграцией услуг (ISDN);
-коммутируемая сеть передачи данных (PSDN);
-сети передачи данных по интернет протоколу (IP).

Рис.5 — Классификация транспортных сетей

Характеристики цифровых линий плезиохронных сетей

E-линии			*T*-линии			
Обозначение потока	**Пропускная способность, кбит/с**	**Число каналов E0**	**Уровень системы**	**Обозначение потока**	**Пропускная способность, кбит/с**	**Число каналов DS0**
E0	64	1	–	DS0	64	1
E1	2048	30	T1	DS1	1544	24
E2	8448	120 (4×E1)	T2	DS2	6312	96 (4×T1)
E3	34368	480 (4×E2)	T3	DS3	44736	672 (7×T2)
E4	139264	1920 (4×E3)	T4	DS4	274175	4032 (6×T3)
E5	565148	7680 (4×E4)	T5	DS5	400652	5760 (240×T1)

Характеристики современных систем SDH

Обозначение потока	**Скорость передачи, Мбит/с**		**Число каналов STM-1**
	полезной нагрузки	**линейная**	
STM-0	48,960	51,840	–
STM-1	150,336	155,520	1
STM-4	601,344	622,080	4
STM-16	2405,376	2488,320	16
STM-64	9621,504	9953,280	64
STM-256	38 486	39 813,120	256
STM-1024	153 944,064	159 252,240	1024

Характеристики сети ISDN

Каналы/интерфейсы сети	**Пропускная способность, кбит/с**	**Число каналов**
B	64	1
D	16	1
BRI	144	2 B + D
PRI	1936	30 B + D

Эволюция систем мобильной сотовой связи

Система	Год	Краткая характеристика системы
1	2	3
		Поколение 0G
MTS	1946	Мобильная телефонная связь (Mobile Telephone Service). Система полудуплексной радиосвязи операторского класса с обеспечением выхода в PSTN (до 25 каналов, диапазон частот 150 МГц)
AMTS	1965	Передовая мобильная телефонная система связи (Advanced Mobile Telephone System) – портативная система полнодуплексной радиосвязи, используемая в Японии (диапазон частот 900 МГц)
IMTS	1969	Усовершенствованная система мобильной телефонной связи (Improved Mobile Telephone Service) – двухдиапазонная система полнодуплексной связи с обеспечением выхода в PSTN (до 9 каналов в диапазоне 35-44 МГц, до 11 каналов в диапазоне 152–158 МГц, до 12 каналов в диапазоне 454–460 МГц; радиус зоны обслуживания 60-100 км)

Поколение 0.5 G		
PALM	1971	Public Automated Land Mobile – автоматизированная наземная сеть мобильной связи с обеспечением выхода в PSTN. Первая система с использованием цифровых сигналов для передачи управляющих сообщений и аналоговых сигналов для передачи голоса
ARP	1971	AutoRadioPuhelin – система автомобильной полудуплексной (позже полнодуплексной) радиосвязи операторского класса с размером зоны обслуживания до 30 км (до 80 каналов в диапазоне частот 150 МГц)
Поколение 1G		
NMT	1979	Nordic Mobile Telephone – скандинавская двухдиапазонная аналоговая система мобильной сотовой телефонной радиосвязи операторского класса, ориентированная на покрытие больших территорий (ширина канала 12.5 кГц, рабочий диапазон частот 450 МГц и 900 МГц)
AMPS	1981	Advanced Mobile Telephone System – усовершенствованная подвижная телефонная система мобильной связи в диапазоне частот от 825 до 890 МГц (более 600 дуплексных каналов, ширина канала 30 кГц, мощность передатчика БС – 45 Вт, мощность передатчика автомобильной подвижной станции – 12 Вт, мощность передатчика переносного аппарата – 1 Вт)

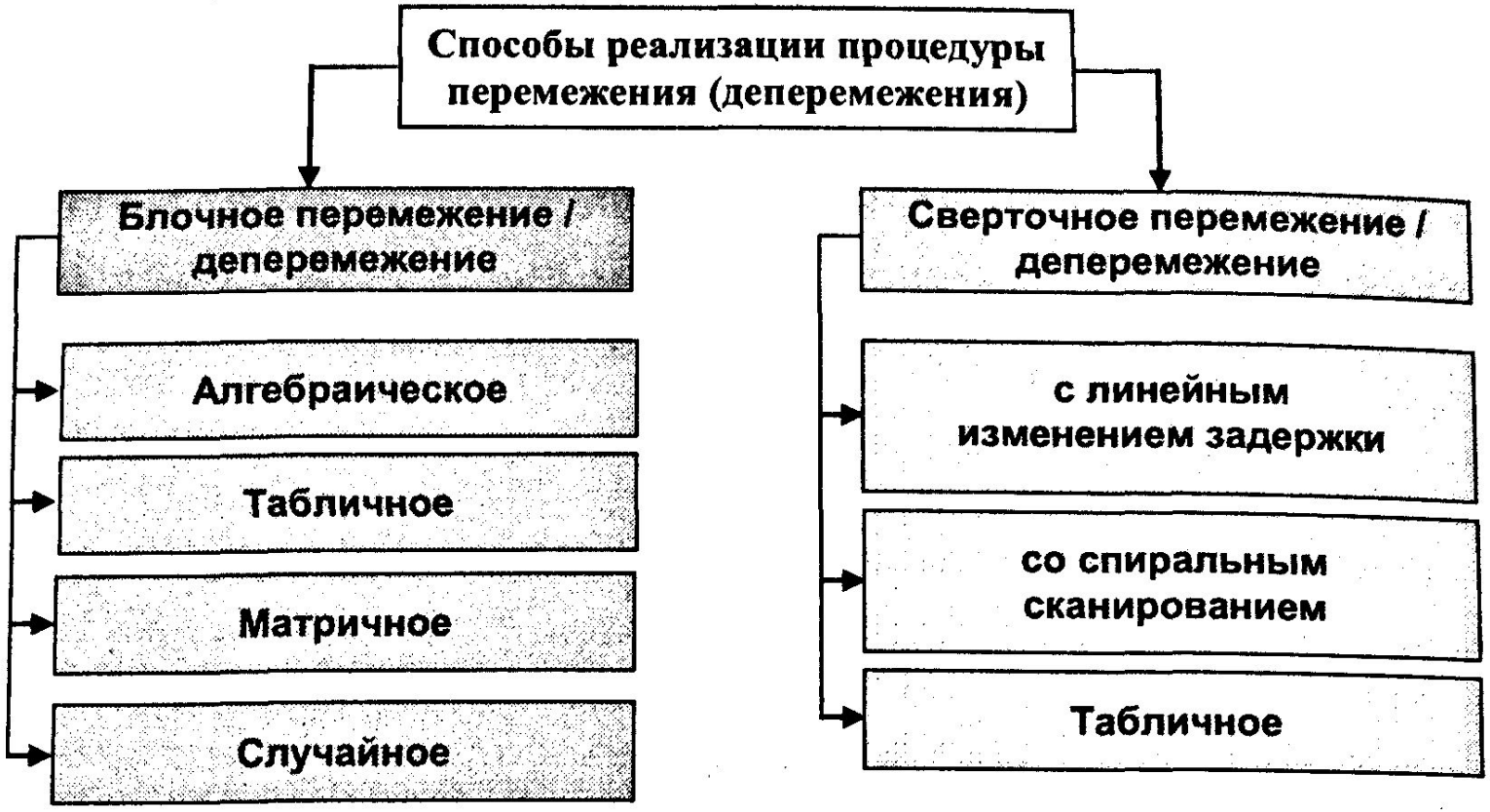
TACS	1983	Total Access Communication Systems – аналоговая система радиосвязи общего пользования в частотном диапазоне 900 МГц (ширина канала 25 кГц, «Европейская версия» AMPS)
Hicap	1985	Система мобильной сотовой радиосвязи – усовершенствованная версия системы NTT (Nippon Telegraph and Telephone, Япония)
Mobitex	1988	Национальная общедоступная сеть беспроводной передачи данных – система передачи данных с общим доступом, включающая сетевую службу двусторонней пейджинговой связи (ширина канала 12.5 кГц, модуляция GMSK)

1	2	3
DataTac	1990	Двухдиапазонная система беспроводной передачи данных, типа Mobitex (ширина канала 25 кГц, диапазоны частот 403–433 МГц и 806–870 МГц, пропускная способность 19.2 кбит/с)
Поколение 2G		
PHS	1990	Personal Handy-phone System – разработанная в Японии система радиосвязи, основанная на использовании портативных телефонов, (TDMA-TDD, диапазон частот 1880–1930 МГц, скорость передачи данных до 32 кбит/с)
GSM	1991	Global System for Mobile Communications – четырехдиапазонная глобальная система мобильной сотовой связи (TDMA; диапазоны частот: 850 МГц, 900 МГц, 1800 МГц и 1900 МГц; модуляция GMSK, ширина канала 200 кГц)
Digital-AMPS	1991	Цифровой вариант аналоговой системы AMPS (FDMA, диапазон 825–890 МГц, модуляция π/4–DQPSK, ширина канала 30 кГц)

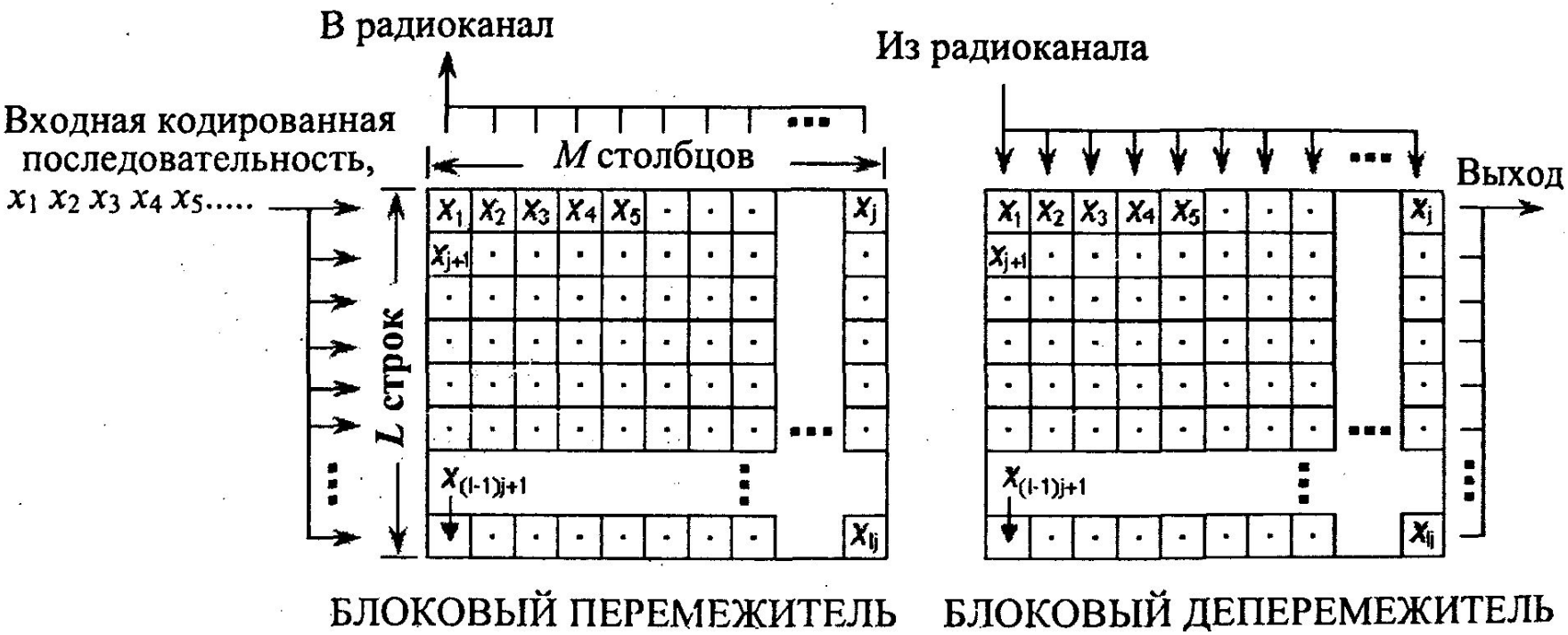
PDC	1992	Personal Digital Cellular – стандарт персональной цифровой сотовой связи (TDMA, диапазон частот 800 МГц, ширина канала 25 кГц). Используется только в Японии
CdmaOne	1995	Первая система с CDMA-доступом и прямым расширением спектра, известная как стандарт IS-95 или TIA-EIA-95 (CDMA, рабочий диапазон частот 800 МГц, ширина канала 1.25 МГц, модуляция BPSK/QPSK)
CSD	1997	Circuit Switched Data – технология передачи данных с коммутацией каналов, изначально разработанная для систем GSM
Поколение 2.5G		
WiDEN	1996	Wideband integrated Dispatch Enhanced Network – широкополосная интегрированная диспетчерская усовершенствованная сеть (до 4 каналов по 25 кГц, пропускная способность 100 кбит/с)
GPRS	2000	General Packet Radio System – усовершенствованная технология пакетной передачи данных для систем GSM (ширина канала 200 кГц, максимальная пропускная способность 171,2 кбит/с)
HSCSD	2000	High-Speed Circuit Switched Data – усовершенствованная технология высокоскоростной передачи данных с коммутацией каналов, совместимая с GSM. Максимальная скорость передачи данных 57,6 кбит/с (качество выше, чем в GPRS)

Перемежение и рандомизация данных

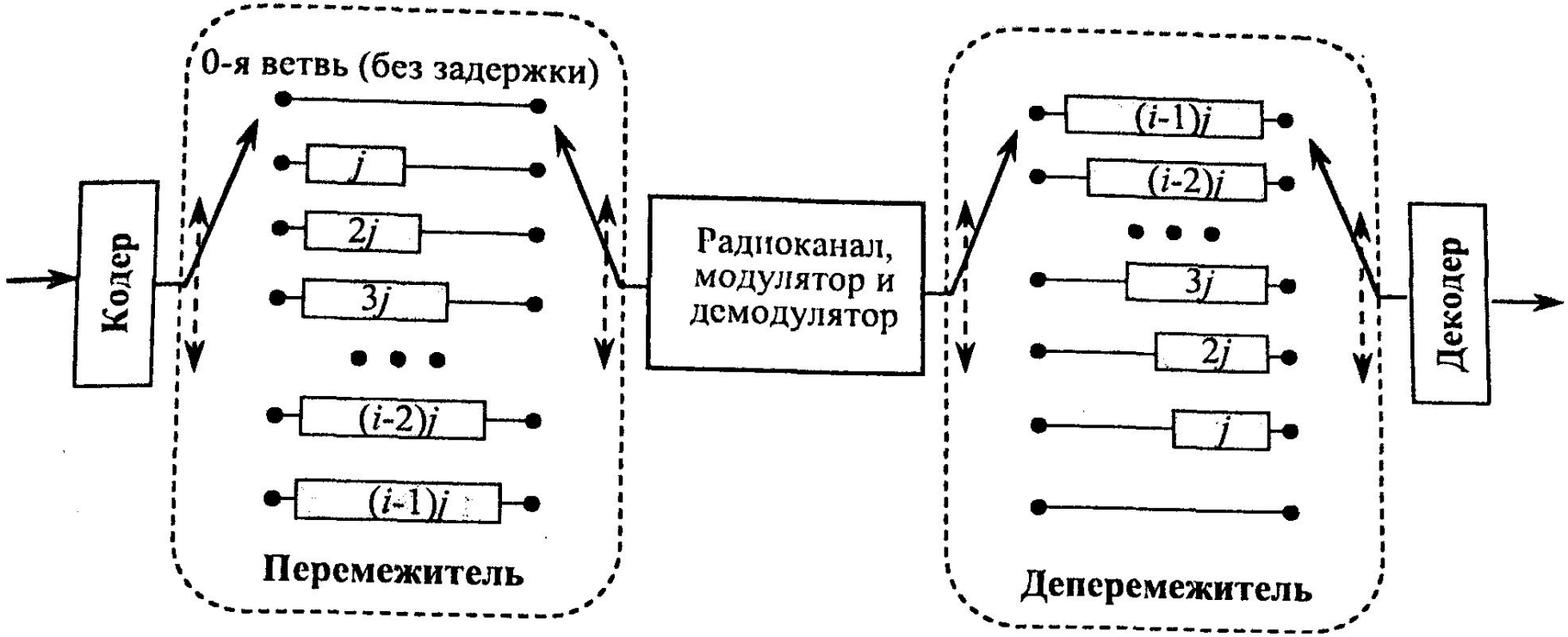
В отличие от мощных корректирующих кодов, перемежение – достаточно экономный дополнительный способ обеспечения помехоустойчивости: не будучи связанным с внесением в канал дополнительной избыточности, оно всего лишь изменяет порядок следования символов.



Принципы блокового перемежения и деперемежения



Процедура сверточного перемежения



Рандомизация

В телекоммуникациях рандомизация служит одной из следующих целей:
повышение надежности синхронизации приемопередающих устройств;
получение равномерного спектра передаваемых сигналов, не зависимого от исходных передаваемых данных;
предотвращение несанкционированного доступа к передаваемым данным.

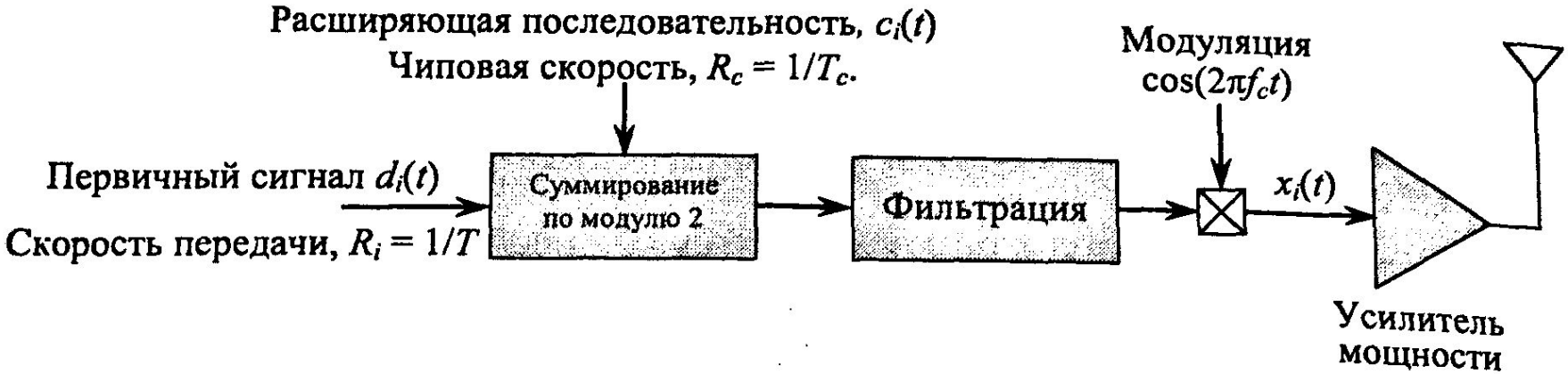
Технологии расширения спектра сигналов

Метод прямого расширения спектра

В системах связи с прямым расширением спектра (DSSS) осуществляется *модуляция несущего колебания по фазе* псевдослучайными последовательностями, тактовая частота которых в SF раз больше верхней частоты спектра сообщения. Модулирующая функция при этом имеет вид

$$c(t) = \sum_{i=1}^{N} x_i u_0[t-(i-1)T_c],$$

где $x_i \in \{-1;1\}$ – символы ПСП, N – ее длина, $u_0(t)$ – единичная функция, T_c – длительность элементарного импульса ПСП (чипа). Вторым уровнем модуляции в системах с СРС является информационная модуляция, используемая для передачи сообщения.



выигрыш обработки (*processing gain, PG*)

Поскольку энергия сигнала определяется как произведение его мощности на длительность, а спектральная плотность шума – как его мощность в полосе приема, соотнесенная к ширине этой полосы, (т.е. $E_S = P_S \cdot T_S$, $N_0 = P_J / \Delta F$), то для двоичной системы связи ($E_S = E_B$):

$$PG = \frac{SNR_{\text{вых}}}{SNR_{\text{вх}}} = \frac{E_S / N_0}{P_S / P_J} = \frac{\Delta F_S \cdot T_S \cdot P_S / P_J}{P_S / P_J} = T_S \cdot \Delta F_S = SF \cdot$$

При типовых значениях коэффициента расширения спектра (например, SF=4÷512 в системе мобильной сотовой связи третьего поколения UMTS) выигрыш обработки достигает десятков децибел. Спектральная плотность помехи (мощность помехи) на входе приемника при этом может многократно превышать спектральную плотность мощности сигнала (мощность сигнала).

Метод расширения спектра скачками по частоте

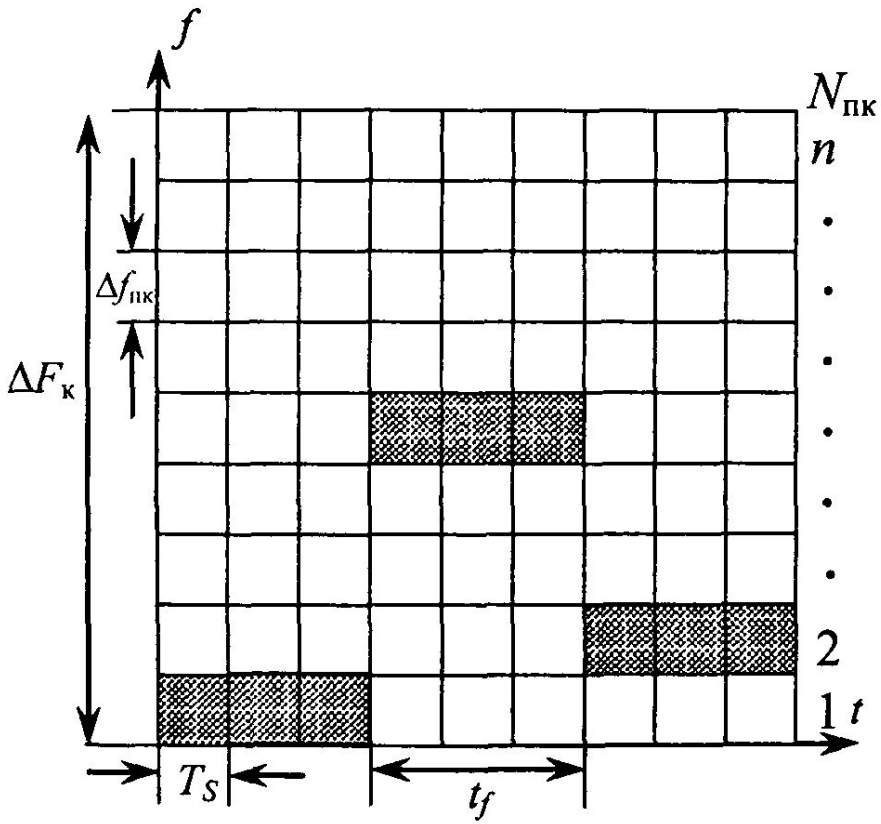
$$u(t)=\sum_{i=1}^{N}u_0[t-(i-1)\tau_э]\exp[j(\omega_i t+\varphi_i)],\quad \text{где } \omega_i=2\pi f_i,\ \varphi_i\in\{0;\pi\}.$$

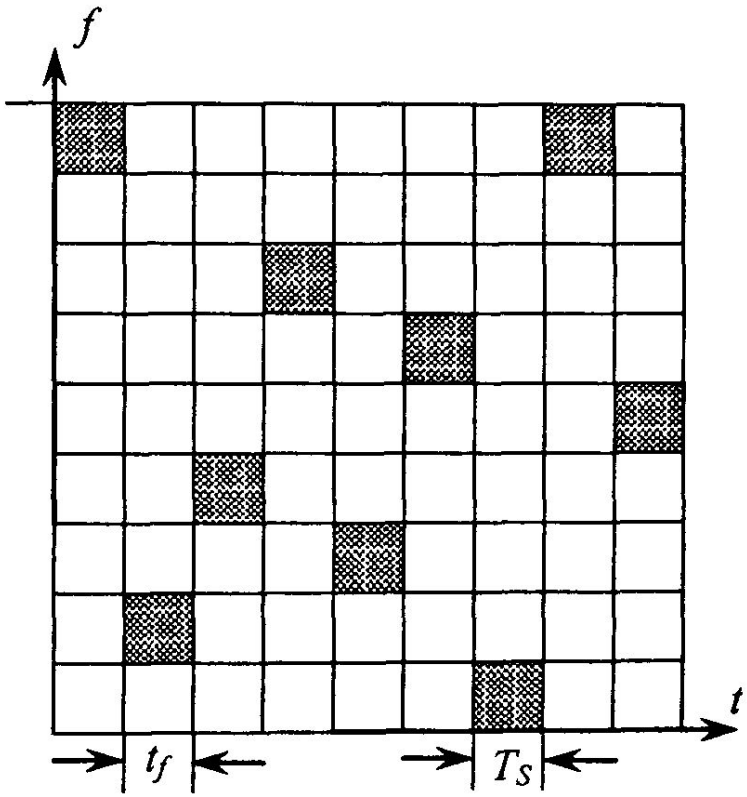
Скорость смены частот определяется скоростью передачи информации от источника сообщений [48]:

$$t_f=\frac{1-RT_S}{t_\Sigma},\ \text{где}$$

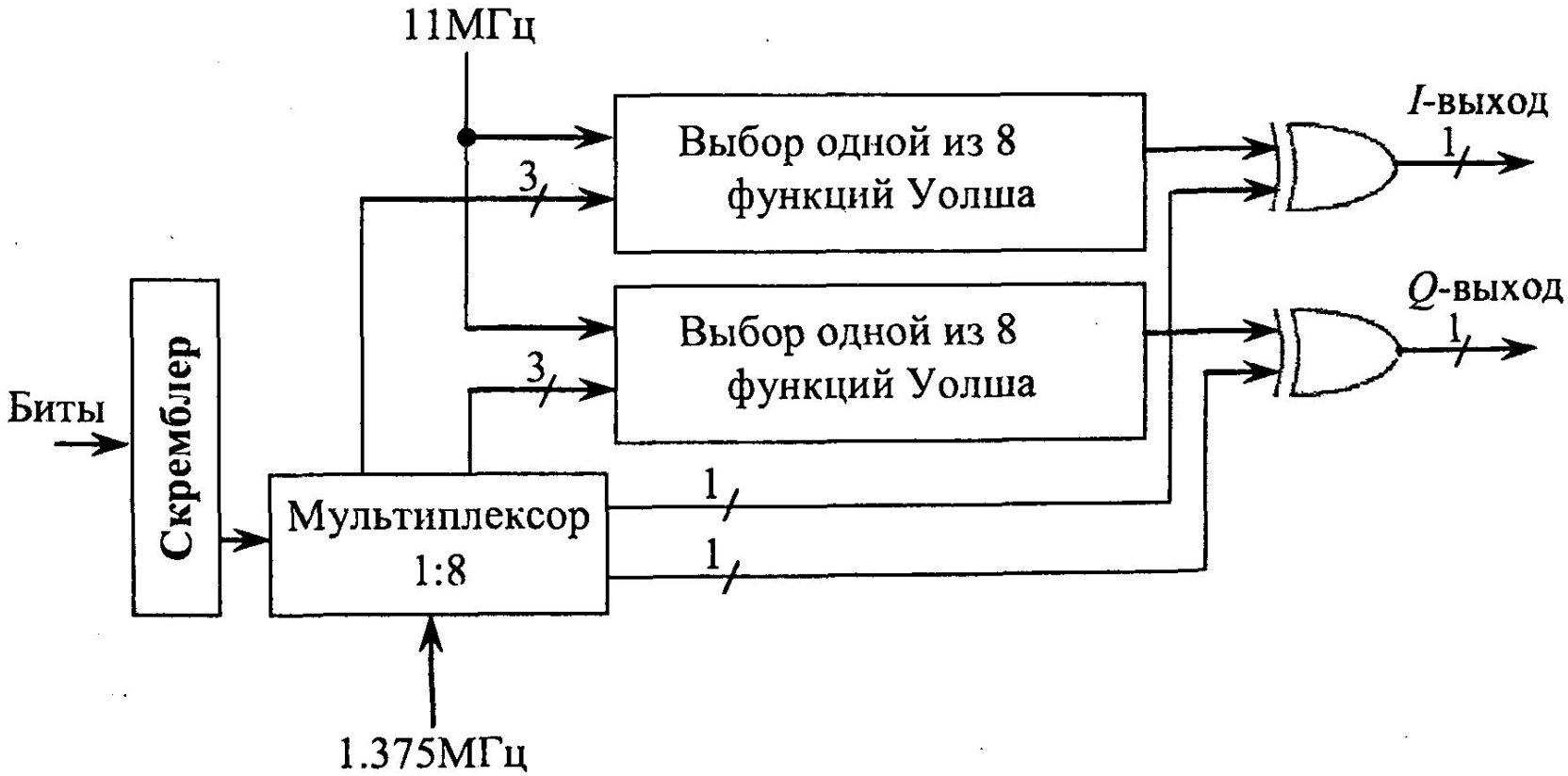
t_f – время работы на одной частоте;
t_Σ – т.н. интервал переключения;
R – скорость передачи данных.

В этой связи также различают посимвольную перестройку (когда $t_f = T_S$), межсимвольную ($t_f = n\cdot T_S$, $n \geq 2$) и внутрисимвольную (при которой $t_f = T_S/N_h$, где N_h – число скачков частоты внутри символа). На рис. 2.47 приведены примеры частотно-временных матриц, задающих порядок изменения значения несущей для случая межсимвольной и посимвольной перестройки частоты [48].


f
$N_{пк}$
n
$\Delta f_{пк}$
$\Delta F_к$
2
1
t
T_S
t_f


f
t
t_f
T_S

M-ичное ортогональное кодирование.

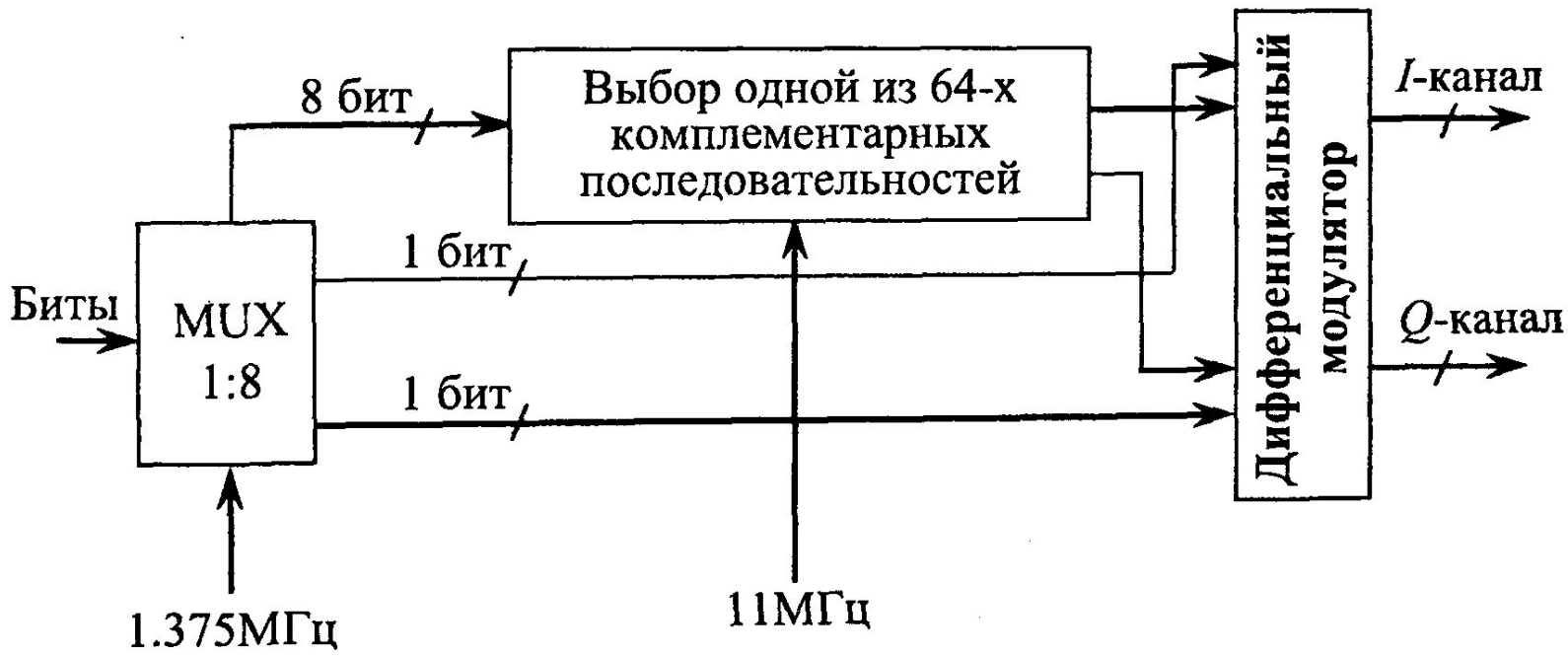


Модуляция комплементарным кодом (CCK)

(complementary) коды были впервые предложены М. Голеем (Golay) в 1961 г. для использования в инфракрасной спектрометрии [50]. В основу их определения положено равенство нулю суммы апериодических автокорреляционных функций (АКФ) групп (чаще всего пар) последовательностей, за исключением нулевого сдвига. Например, для последовательностей $\{\alpha\}_N$ и $\{\beta\}_N$ длиной N данное условие принимает вид

$$\rho_\alpha(m)+\rho_\beta(m)=0 \text{ при } m\neq 0, \quad \rho_\alpha(0)+\rho_\beta(0)=2N,$$

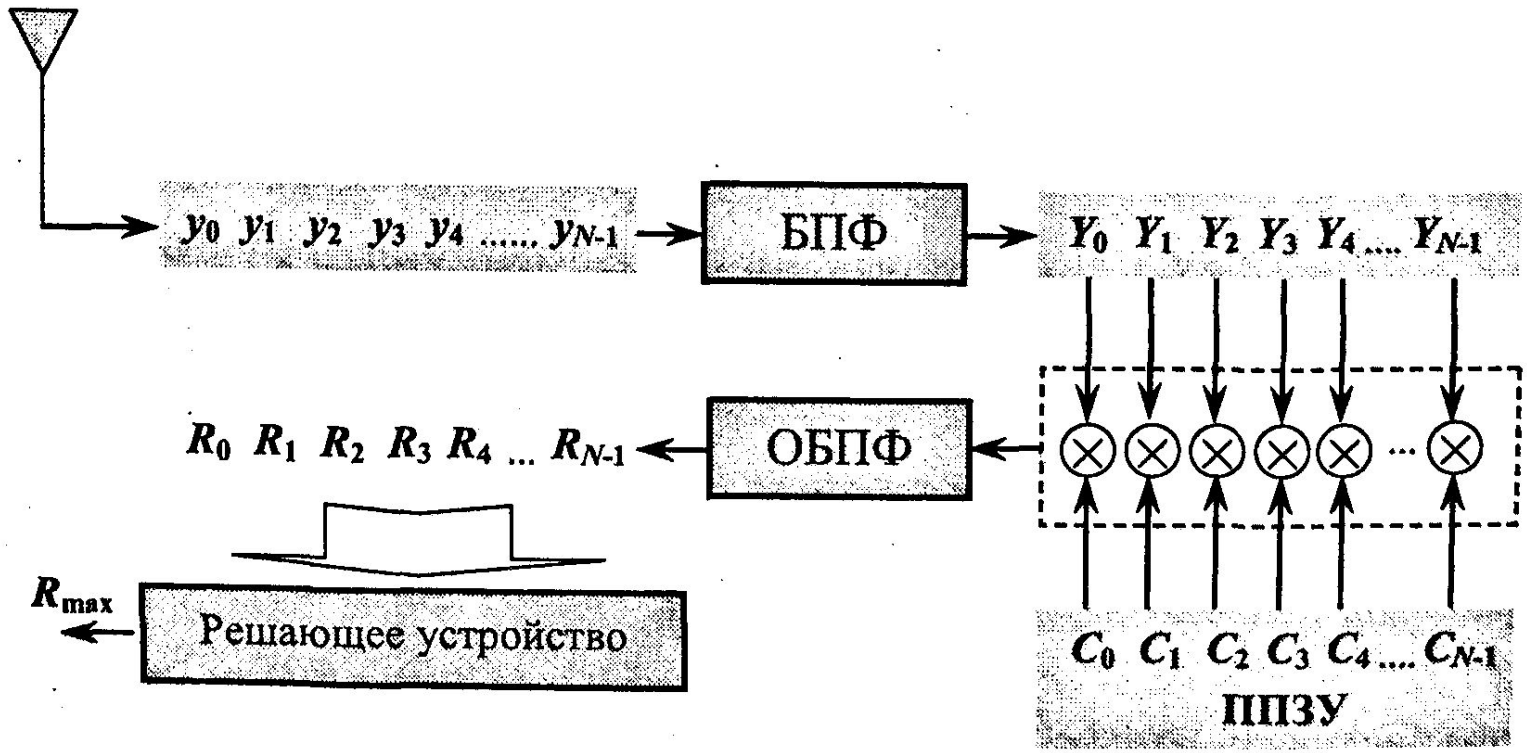
где $\rho_\alpha(m)=\sum^{N-1-m}\alpha_i\alpha_{i+m}$, $\rho_\beta(m)=\sum^{N-1-m}\alpha_i\alpha_{i+m}$ – АКФ $\{\alpha\}_N$ и $\{\beta\}_N$.



Модуляция циклическим сдвигом кода

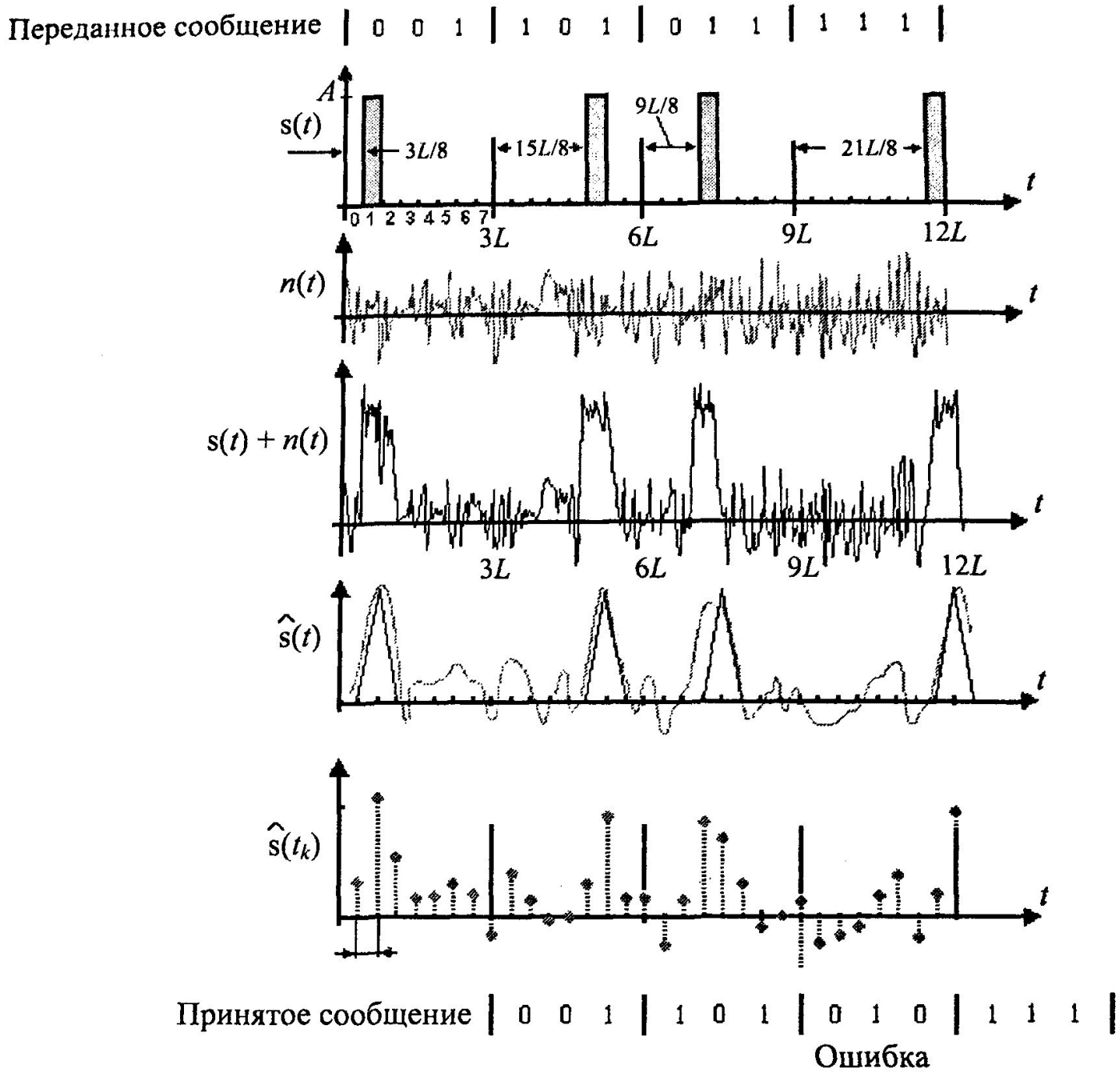
(*Cyclic Code Shift Keying*–

CCSK). При этом виде модуляции алфавит сигналов формируется циклическими сдвигами одной единственной исходной кодовой последовательности $c_0, c_1, ..., c_{N-1}$ длины N (она же выполняет роль опорной копии сигнала в корреляторе) [49,56]. После установления синхронизации процедура оптимального приема сводится к вычислению ВКФ зашумленного сигнала на входе с его опорной копией.



Время-импульсная модуляция

При время-импульсной модуляции (ВИМ, англ. PTM – Pulse Time Modulation) передача информации осуществляется импульсами разной длительности. ВИМ подразделяется на широтно-импульсную модуляцию (ШИМ, англ. PWM – Pulse Width Modulation) и фазо-импульсную (ФИМ, PPM – Pulse Position Modulation). Последняя наиболее распространена в современных телекоммуникациях. Передаваемое сообщение при ВИМ заключено во временном положении символов в пределах слотов, отведенных для передачи. По своей сути, ВИМ может быть отнесена к методам расширения спектра и к методам информационной модуляции сигнала одновременно [36].


Переданное сообщение
0 0 1
1 0 1
0 1 1
1 1 1
A
s(t)
3L/8
15L/8
9L/8
21L/8
t
0 1 2 3 4 5 6 7
3L
6L
9L
12L
n(t)
s(t) + n(t)
ŝ(t)
ŝ(tk)
Принятое сообщение
0 0 1
1 0 1
0 1 0
1 1 1
Ошибка

Множественный доступ к среде передачи

Понятие множественного (многостанционного) доступа (Multiple Access) к среде передачи связано с организацией совместного использования канальных ресурсов телекоммуникационной системы многими пользователями.

Основные методы множественного доступа в беспроводной связи

Методы «контролируемого» доступа	Протоколы «состязательного» доступа
FDMA (*Frequency Division Multiple Access*)	**ALOHA**
TDMA (*Time Division Multiple Access*)	**S-ALOHA** (*Slotted* ALOHA)
CDMA (*Code Division Multiple Access*)	**CSMA** (*Carrier sense Multiple Access*)
SDMA (*Space Division Multiple Access*)	**DAMA** (*Demand Assigned Multiple Access*)
PDMA (*Polarization Division Multiple Access*)	**MACAW** (*Media Access Protocol for WLAN's*)

Как видно из таблицы, контролируемый доступ предполагает разделение пользователей по одному из видов «физического» ресурса: частотного (Frequency Division), временного (Time Division), кодового (Code Division), значительно реже – пространственного (Space Division) и поляризационного (Polarization Division). На их основе могут быть построены гибридные схемы множественного доступа: FDMA/TDMA (используемая в системе GSM), FH-CDMA, TD-CDMA и OFDMA.

Методы состязательного доступа различаются не в зависимости от вида распределяемого ресурса, а согласно наборам правил, которыми руководствуются пользователи системы, конкурируя за этот ресурс. Поэтому во многих источниках эти методы именуют *протоколами доступа*, что, пожалуй, более верно.