ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ВОЙСК НАЦИОНАЛЬНОЙ ГВАРДИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Главное управление вневедомственной охраны

УТВЕРЖДЕНЫ
Первым заместителем
начальника
ГУВО Росгвардии
генерал-майором полиции
А.В. Грищенко
26 мая 2017 г.

Методические рекомендации

Применение современных видов модуляции и организация обмена информацией в радиоканальных системах передачи извещений

Р 061 – 2017

Москва
2017

Методические рекомендации разработаны сотрудниками ФКУ «НИЦ «Охрана» Росгвардии А.Р. Фамильновым, А.И. Бариновым, И.М. Нурмухаметовым, А.В. Голубевым, К.В. Колесовым, О.А. Хлыстовой, А.А. Клочковым, С.Н. Сухих, И.А. Захаровым, Ю.А. Сафоновым под руководством А.Г. Зайцева с учетом замечаний и предложений сотрудника ГУВО Рогвардии А.А. Михайлова.

Применение современных видов модуляции и организация обмена информацией в радиоканальных системах передачи извещений: Методические рекомендации (Р 061 – 2017). – М.: ФКУ «НИЦ «Охрана» Росгвардии, 2017. – 50 с.

Методические рекомендации предназначены для оказания методической помощи в практической деятельности инженерно-техническому персоналу подразделений вневедомственной охраны Федеральной службы войск национальной гвардии Российской Федерации.

© ФКУ «НИЦ «Охрана» Росгвардии, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

1. Термины и сокращения 5

2. Введение 6

3. Алгоритмы и методы модуляции, применяемые в РСПИ 12

4. Многопозиционные и комбинированные методы модуляции 14

5. Современные методы организации радиосвязи 22

6. Сравнительный анализ различных методов модуляции 29

7. Обзор и анализ элементной базы для реализации современных методов модуляции в РСПИ на отечественном и зарубежном рынке 33

8. Заключение. Критерии оценки и выбор оптимального метода модуляции 44

9. Список использованной литературы 48

1 Термины и сокращения

Амплитудная модуляция – передача информационных посылок путём изменения амплитуды несущего высокочастотного радиосигнала.

Бод – единица измерения символьной скорости, количество изменений информационного параметра несущего периодического сигнала в секунду.

Девиация частоты (frequency deviation) – наибольшее отклонение значения модулированного сигнала от значения его несущей частоты. Единицей девиации частоты является герц (Гц), а также кратные ему единицы.

Модуляция – процесс изменения одного или нескольких параметров высокочастотного несущего колебания по закону низкочастотного аналогового сигнала передаваемого сообщения.

Частотная модуляция – передача информационных посылок путём изменения частоты несущего высокочастотного радиосигнала.

ФАПЧ – система фазовой автоподстройки частоты.

ASK – (Amplitude shift keying) –амплитудная манипуляция.

M-ASK – многопозиционная амплитудная модуляция.

BPSK – (Binary Phase Shift Keying) – двоичная фазовая манипуляция.

DBPSK – дифференциальная двоичная фазовая манипуляция.

DQPSK – дифференциальная квадратурная фазовая манипуляция.

M–PSK – многопозиционная фазовая модуляция.

DSB – балансной амплитудная модуляция.

FSK – (Frequency Shift Keying) – частотная манипуляция.

QAM – квадратурная амплитудная модуляция

OOK – (On/Off Keying) – модуляция включением/ выключением.

ГУН – генератор управляемый напряжением

Индекс модуляции (modulation index) – отношение максимального изменения несущей частоты (девиации) к частоте модулирующего сигнала.

ЛЧМ – вид частотной модуляции, при которой частота несущего сигнала изменяется по линейному закону.

ПЦН – пульт централизованного наблюдения.

ПЦО – пункт централизованной охраны.

РСПИ – радиоканальная система передачи извещений–система централизованной охраны, в которой извещения с охраняемых объектов на ПЦН и команды управления объектовому оборудованию осуществляются по радиоканалу.

2 Введение

Настоящие рекомендации предназначены для инженерно-технического персонала ПЦО, обслуживающего объектовое, ретрансляционное и пультовое оборудование РСПИ, а также специалистов предприятий – изготовителей РСПИ.

В данных рекомендациях дан обзор алгоритмов обмена информацией и методов модуляции в радиоканальных системах передачи извещений, применяемых подразделениями вневедомственной охраны Росгвардии, представлен анализ и сравнительные характеристики современных перспективных видов модуляции.

В технике цифровой связи методы модуляции играют весьма значительную роль. Помимо своей основной функции – преобразования «символ – сигнал» – процесс модуляции является составной частью общего процесса согласования сигнала с характеристиками канала.

Идея способа, позволяющего переносить спектр сигнала в область высоких частот – модулировать высокочастотное радиоволновое колебание, заключается в следующем. В передатчике формируется вспомогательный высокочастотный сигнал, называемый несущим колебание. В радиотехнике, и в частности в РСПИ, широкое распространение получили системы модуляции, использующие в качестве несущего простое гармоническое колебание описываемое формулой $U(t)=U\sin(\omega t+\varphi)$, имеющего три свободных параметра:

U – амплитуду, ω– частоту и φ – фазу.

Пусть $c(t)$ низкочастотное сообщение, подлежащее передаче по радиоканалу. Если, по крайней мере, один из указанных параметров изменяется во времени пропорционально передаваемому сообщению, то несущее колебание несёт в себе информацию, заключённую в $s(t)$. Физический процесс управления параметрами несущего колебания называется модуляцией.

Основные принципы построения различных видов модуляции проще всего проанализировать на основе синусоидального сигнала (Рис. 1).

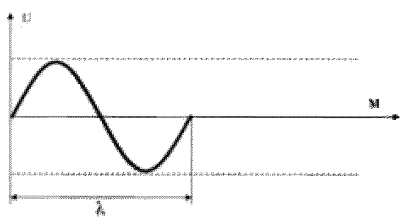

Рис.1. Временная диаграмма гармонического синусоидального сигнала

Таким образом, для передачи информации, а значит модулирования несущего колебания, доступны: амплитуда, частота, фаза.

Наиболее простым видом модуляции является амплитудная модуляция. При передаче информации с применением данного способа модуляции изменению подвергается амплитуда несущего колебания.

Модулированный сигнал для этого вида модуляции имеет вид:

$$U(t)=A(c(t)+B)\cos(\omega t+\varphi),$$

где c(t) – информационный сигнал, A, B и φ – постоянные, $B \geq 0$, – ω – несущая частота. Пусть множество возможных значений c(t)= {0,1}, а B = 0. В этом случае модулированный сигнал имеет вид $U(t)=A(c(t)\cos(\omega t+\varphi)$, его амплитуда равна 0 при нулевом значении информационного сигнала и A при единичном. Такой тип модуляции называется OOK – (On/Off Keying) модуляция включением/ выключением.

На рисунке 2б показана временная диаграмма амплитудно-модулированного сигнала: информационный «0» передаётся пассивной паузой (отсутствием несущей), а «1» активным пакетом (передачей несущей).

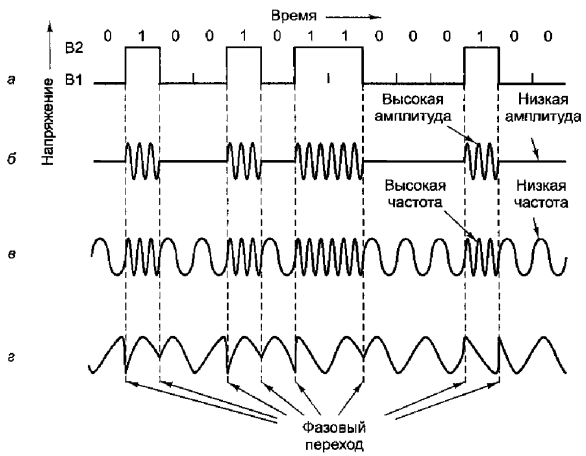

Рис. 2. Временные диаграммы различных видов модулированных сигналов

Частотная модуляция является наиболее распространённым видом модуляции радиочастотных сигналов и нашла широкое применение в связи и телефонии.

В случае осуществления частотной модуляции параметром несущего колебания – носителем информации, на который наклады-

вается модулирующее воздействие, является несущая частота $\omega(t)$, амплитуда и фаза остаются постоянными.

При частотной модуляции несущая частота $\omega(t)$ связана с модулирующим сигналом $c(t)= C0 \cos(\omega_{мод} t)$ зависимостью:

$$\omega(t) = \omega_0 + k_ч c(t)$$

где $k_ч$ – размерный коэффициент пропорциональности между частотой и напряжением.

Частотно – модулированный радиосигнал можно записать в виде формулы:

$$U(t)=A\cos(\omega_0 t + m_ч \sin \omega_{мод} t)$$

где ω_0 – частота несущего колебания в отсутствие ЧМ сигнала; $\omega_{мод}$ – частота изменения модулирующего сигнала; $m_ч$ – индекс частотной модуляции.

Индекс частотной модуляции определяется отношением девиации частоты (максимальное изменение частоты несущего сигнала) к частоте модулирующего сигнала:

$$m_ч = k_ч C_0 / \omega_{мод}$$

Чем выше индекс модуляции, тем выше помехоустойчивость РСПИ, но вместе с тем и пропорционально расширяется спектр сигнала.

На рисунке 2в показана временная диаграмма сигнала, сформированного методом частотной модуляции.

На рисунке 3 представлены спектры частотно-модулированных сигналов с различными индексами модуляции: а) m=0.5, б) m=1, в) m=5.

В случае, когда информационный сигнал принимает только 2 возможных значения имеет место двоичная частотная модуляция FSK – (Frequency Shift Keying). Информационный сигнал является полярным, т.е. принимает значения {-1,1}, где -1 соответствует значению исходного (неполярного) информационного сигнала 0, а 1 – единице. Таким образом, при двоичной частотной модуляции множеству значений исходного информационного сигнала {0,1} ставится в соответствие множество значений частоты модулированного радиосигнала $\{\omega_0 - \omega_д, \omega_0+\omega_д\}$.

Ещё одним видом модуляции радиосигналов является фазовая модуляция. При передаче информации с применением фазовой модуляции в соответствии со значением информационного сигнала изменяется фаза несущего высокочастотного колебания. Фазомодулированный сигнал можно описать формулой:

$$U(t)=A \cos(\omega t+\varphi(t) +\varphi_0)$$

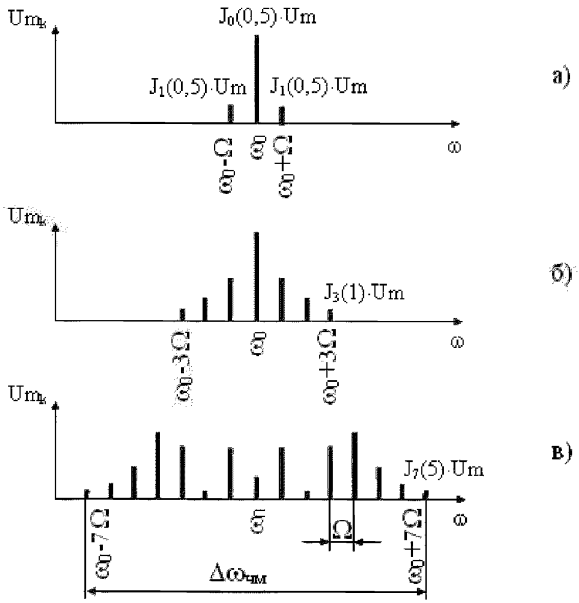

Рис. 3. Спектры частотно-модулированного сигнала при различных значениях m

Информация при использовании данного метода модуляции кодируется фазой $\varphi(t)$. Так как при когерентной демодуляции в приёмнике имеется восстановленная несущая $U_c(t)=A\cos(\omega t + \varphi_0)$, то путём сравнения сигнала $U(t)$ с несущей вычисляется текущий сдвиг фазы $\varphi(t)$. Изменение фазы $\varphi(t)$ взаимно однозначно связано с информационным сигналом $c(t)$. На рис. 2г) показана временная диаграмма фазомодулированного сигнала.

Наиболее простой разновидностью данного вида передачи информации является двоичная фазовая манипуляция BPSK (Binary Phase Shift Keying). Множеству значений информационного сигнала {0,1} ставится в однозначное соответствие множество изменений фазы {0, π}. При изменении значения информационного сигнала фаза радиосигнала изменяется на π. Таким образом, сигнал BPSK можно записать в виде:

$$U(t)=\begin{cases} A\cos(\omega t+\varphi_0), & c(t)=1 \\ A\cos(\omega t+\pi+\varphi_0)=A\cos(\omega t+\varphi_0), & c(t)=0 \end{cases}$$

Удобным средством анализа характеристик модулированных сигналов является отображение их с помощью полярных и квадратурных диаграмм в виде сигнальных созвездий.

Известно, что модулированный сигнал с произвольным видом модуляции можно представить в виде:

$$U(t) = I(t) \cos(\omega_0 t) - Q(t) \sin(\omega_0 t)$$

где I(t) и Q(t) называются синфазной и квадратурной составляющими модулирующего сигнала соответственно. Низкочастотные сигналы I(t) и Q(t) формируются из исходного сообщения аппаратным или программным способом. Закон, по которому выполняется это преобразование, определяет вид модуляции сигнала. В общем случае при использовании цифровых модулирующих сигналов их количество значений может быть произвольным. Число этих значений называется позиционностью модуляции и обозначается m. В простейшем случае m равно 2. Например, при амплитудной манипуляции значение амплитуды несущей, соответствующее логической «1» будет равно U_0, логическому «0» будет соответствовать нулевая амплитуда (отсутствие сигнала). Соответственно число возможных значений синфазных I(t) и квадратурных Q(t) компонент для формирования U(t) ограничено тем же числом значений. Множество возможных значений квадратурных компонент принято отображать на декартовой плоскости, показанной на рисунке 4, где по оси абсцисс отложены значения синфазной составляющей, а по оси ординат – квадратурной. Такую диаграмму называют сигнальным созвездием.

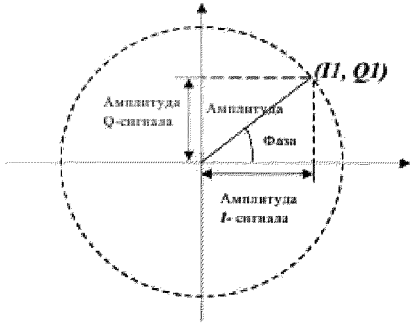

Рис. 4. Изображение синфазной и квадратурных компонент на декартовой плоскости.

Радиосигнал в этом случае представляется в виде двухмерной точечной диаграммы на комплексной плоскости, точками на которой являются все возможные символы, представленные в гео-

метрической форме. Более абстрактно, на диаграмме отмечены все значения, которые могут быть выбраны данной схемой манипуляции, как точки на комплексной плоскости. Точки на диаграмме часто называют сигнальными точками (или точками созвездия). Они представляют множество модулирующих символов, то есть модулирующий алфавит.

Сигнальное созвездие можно использовать в графическом виде для сравнения помехозащищенности разных видов модуляции. Чем дальше символы на графической плоскости отстоят друг от друга, тем выше помехоустойчивость.

Сигнальные созвездия, полученные в результате исследования радиосигнала, могут использоваться для определения типа манипуляции, рода интерференции и уровня искажений. Ниже представлены сигнальные созвездия для амплитудной модуляции типа OOK (рис. 5 а) и типа ASK (рис. 5 б).

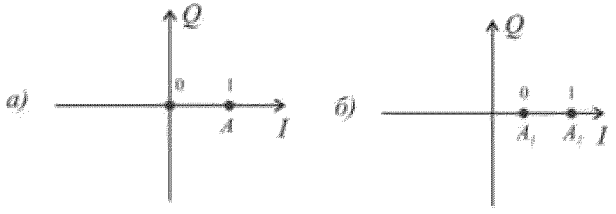

Рис. 5. Сигнальные созвездия для модуляции типа OOK и ASK.

Сигнальные созвездия для различных схем фазовой и амплитудно-фазовой манипуляции сигналов представлены на рис. 6:

– BPSK – двоичная фазовая манипуляция;

– QPSK (4QAM) – четырёхпозиционная амплитудно-фазовая манипуляция;

– 16 QAM – шестнадцатипозиционная амплитудно-фазовая манипуляция.

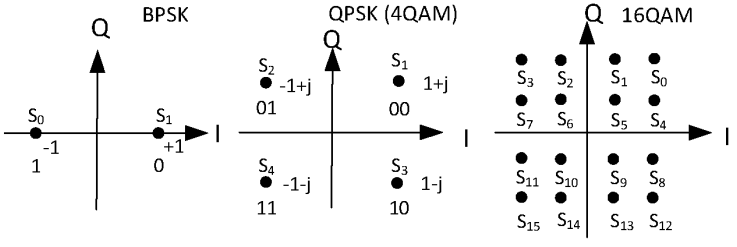

Рис. 6. Сигнальные созвездия для различных схем модуляции

Следует отметить, что на сигнальном созвездии положения всех значений символов равноудалены от начала координат. Это означает равенство амплитуд всех символьных колебаний. Требование расположения символов по углам квадрата не является обязательным. Они могут располагаться и по окружности. Следует отметить, что можно позиционность модуляции, делая сдвиги фаз на меньший угол. Тогда в каждом символе будет передаваться большее количество бит и на сигнальном созвездии будет больше точек. Но в этом случае труднее будет в условиях воздействия шумов различать фазовые углы на приеме, поэтому возрастает вероятность ошибочного восстановления при приеме символов.

В случае с методом модуляции 16 QAM необходимо отметить, что разные канальные символы этого сигнала имеют разную энергию. Расстояние между разными сигнальными точками также оказывается различным. В результате вероятность перепутывания символов в приемнике для разных символов оказывается разной.

Один канальный символ такого сигнала может переносить $n=\log_2 m$ информационных битов. В частности, при $m=16$ имеем $n=4$. Поэтому если по-прежнему считать, что длительность одного бита равна то длительность одного канального символа QAM-сигнала равна $T_{KC} = nT_C$. Следовательно, при формировании этого сигнала поток информационных битов должен группироваться в блоки по n битов. Каждому блоку должен быть поставлен в соответствие один канальный символ. Установление такого соответствия называется сигнальным кодированием.

3 Алгоритмы и методы модуляции, применяемые в РСПИ

Каждая из радиоканальных систем передачи извещений, применяемых в практической деятельности подразделений вневедомственной охраны, имеет свои технические особенности. Эти различия распространяются как на структурное построение систем, так и на способы реализации ретрансляционного и объектового оборудования. Данные особенности позволяют осуществлять выбор РСПИ, в наибольшей степени соответствующей местным условиям эксплуатации, (мегаполис, районный центр, пригород, сельская местность и т.п.).

Не последнюю роль в выборе РСПИ играет применяемый вид модуляции информационного сигнала, от которого зависят ширина спектра излучения, скорость передачи данных, криптостойкость, помехозащищенность, сложность и стоимость реализации и т.п.

В РСПИ, используемых подразделениями вневедомственной охраны в основном используется самый простой метод модуляции несущего радиоволнового колебания частотный (FSK). В РСПИ «Струна-5» применяется узкополосная ЧМ. Данный метод частотной модуляции отличается от общепринятой FSK тем, что индекс модуляции m меньше 1. Но среди методов частной модуляции имеется еще манипуляция с минимальным частотным сдвигом (MSK), гауссовская манипуляция с минимальным сдвигом (GMSK). В таблице 1 представлены характеристики РСПИ, применяемых подразделениями вневедомственной охраны полиции в части применяемых в них методов модуляции и организации канала связи с ПЦН.

Кроме того, РСПИ подразделяются по принципу построения на:

1. Асинхронные РСПИ (односторонние по направлению передачи информации, от устройства объектового (УО) к пульту централизованного наблюдения (ПЦН);

2. Двухсторонние РСПИ (по направлению передачи извещений от УОО к ПЦН, команд и запросов от ПЦН к УОО).

Отличительным признаком асинхронных РСПИ является наличие только передатчика в УО, поскольку передача информации осуществляется в одном направлении (от объекта охраны на ПЦН).

Обязательным признаком двусторонних РСПИ является наличие в составе объектового устройства приемника.

В односторонних системах применяются коды с обнаружением ошибок с последующим исключением принятых сообщений и коды с возможностью исправления выявленных ошибок.

Таблица 1

№ п/п	РСПИ, производитель	Метод модуляции	Организация связи
1.	«Стрелец-Аргон». ЗАО«Аргус-Спектр», г. С-Петербург	ЧМ	Двунаправленная, асинхронная
2.	«Иртыш-3Р», ООО НТК «ИНТЕКС», г. Омск	ЧМ	Двунаправленная, синхронная
3.	«Приток-А-Р», ОБ «СОКРАТ», г. Иркутск	ЧМ	Двунаправленная, синхронная
4.	«Протон» ООО НПО«ЦЕНТР-ПРОТОН», г. Челябинск	ЧМ	Двунаправленная, асинхронная
5.	«Струна-5» ЗАО НПФ «Интеграл+» г. Казань	ЧМ	Двунаправленная, синхронная
6.	«Струна-М», «Радиосеть» ООО НПП «АСБ Рекорд», г. Александров	ЧМ	Двунаправленная, синхронная

В двухсторонних системах применяются коды с обнаружением и исправлением ошибок, как правило, с использованием механизма автоматического запроса повторной передачи.

Ситуация, при которой практически все производители РСПИ используют один и тот же базовый (FSK) метод модуляции при передаче информации по радиоканалу, является неприемлемой. На сегодняшний день существует реальная потребность в применении современных комбинированных и многопозиционных методов модуляции, позволяющих повысить скорость передачи в канале, и соответственно получить возможности применения методов помехо- и криптозащищённости передаваемой информации, минимизировать вероятность подавления радиосигнала для охраны, например, критически важных объектов. Кроме того, немаловажным фактором является и возможность увеличения информационной емкости РСПИ.

4 Многопозиционные и комбинированные методы модуляции

Современный уровень развития радиоэлектроники позволяет реализовывать сложные виды модуляции, такие как: многопозиционные схемы модуляции M-ASK, M-PSK, DSB – балансная амплитудная модуляция с подавлением несущей, SSB – однополосная амплитудная модуляция, MSK – модуляция с минимальной частотной манипуляцией, GMSK – модуляция с гауссовой огибающей, 4FSK – четырехуровневая частотная манипуляция, BPSK-сигналы с двоичной фазовой манипуляцией, QPSK – сигналы с квадратурной фазовой манипуляцией, M-PSK – многопозиционная фазовая модуляция, QAM-амплитудно-фазовая модуляция и т.д.

Ниже рассмотрены характеристики и особенности каждого из перечисленных видов модуляции.

При амплитудной модуляции по схеме ASK множество возможных значений амплитуды радиосигнала ограничивается двумя значениями модулирующего сигнала. Спектральная плотность может быть существенно повышена, если использовать большее количество различных значений амплитуды радиосигнала. Достигается это применением многопозиционной амплитудной модуляции – M-ASK модуляции.

Биты исходного информационного сообщения группируются в пары. Каждая такая пара называется символом. Если каждый бит имеет множество значений {0,1}, то каждый символ имеет четыре возможных значения из множества {00, 01, 10, 11}. Каждому из воз-

можных значений символа ставится в соответствие значение амплитуды радиосигнала из множества {0, A, 2A, 3A}. Аналогично группируются тройки, четверки и большее количество бит в одном символе. Таким образом, получается многоуровневый (многопозиционный) сигнал M-ASK с размерностью множества возможных значений амплитуды сигнала $M = \log_2 k$, где k – число бит в одном символе. Например, сигнал с модуляцией 256-ASK имеет 256 возможных значений амплитуды сигнала и 8 бит в одном символе.

Формула для сигнала M-ASK имеет вид аналогичный сигналу ASK, но функция c(t) в данном случае является многоуровневым информационным сигналом, представляющим собой последовательность символов с возможными значениями {0,1,2...M-1}.

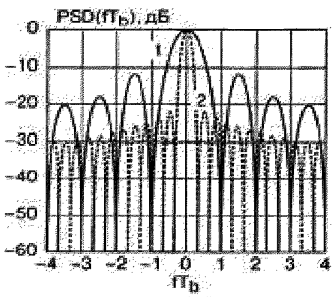

Рис. 7. Спектральные плотности модулированных сигналов ASK и 8-ASK.

На рис.7 представлены спектральные плотности восьмиуровневого сигнала 8-ASK – график 2 и сигнала ASK с импульсами прямоугольной формы – график 1. Многопозиционный сигнал имеет меньшую ширину главного лепестка (занимает меньшую полосу частот) и более низкий уровень боковых лепестков, т.е. имеет большую спектральную эффективность по сравнению с двухпозиционным сигналом.

Сигнальное созвездие для восьмиуровневого метода модуляции 8-ASK представлено на рис. 8.

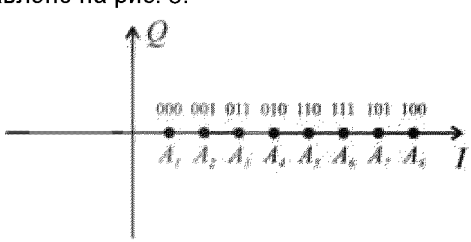

Рис. 8. Сигнальное созвездие для 8-ASK

В спектре амплитудно-модулированного сигнала передаваемая информация содержится только в боковых полосах, несущая же полезной информации не несет. Поэтому целесообразно не тратить энергию на передачу «бесполезной» несущей (на самом деле несущая необходима при демодуляции передаваемого сигнала). Амплитудная модуляция с подавленной несущей называется балансной модуляцией или DSB (Double Side Band). Для ее осуществления на один вход аналогового перемножителя подается сигнал несущей, а на второй – сигнал огибающей без постоянной составляющей.

Спектр этого сигнала не содержит несущей, а только две боковые частоты или полосы.

Амплитудные виды модуляции имеют невысокую энергетическую эффективность (так как средний уровень мощности существенно меньше максимального), требуют высокой линейности и большого динамического диапазона усилителя мощности. Ошибка в амплитуде сигнала из-за нелинейности усилителя приведет непосредственно к символьной ошибке, т.к. значение символа определяется амплитудой сигнала. Отношение максимальной амплитуды сигнала к минимальной достаточно высоко и требует усилителя с большим динамическим диапазоном. Влияние аддитивного шума или помехи непосредственно изменяет амплитуду сигнала, поэтому амплитудные виды модуляции не обладают высокой помехоустойчивостью. Виду указанных недостатков амплитудные виды модуляции находят ограниченное применение.

К преимуществам данных методов модуляции следует отнести их простоту в реализации.

Квадратурная амплитудная модуляция – QAM (Quadrature amplitude modulation) –относится к комбинированным методам модуляции. В случае QAM промодулированный сигнал представляет собой сумму двух ортогональных несущих: косинусоидальной и синусоидальной, амплитуды, которых принимают независимые дискретные значения. При квадратурной амплитудной модуляции изменяется как фаза, так и амплитуда несущего сигнала. Это позволяет увеличить количество кодируемых в единицу времени бит и при этом существенно повысить помехоустойчивость их передачи по каналу связи. В настоящее время число кодируемых информационных бит на одном бодовом интервале может достигать 8–9 (т.е. информационная скорость может превышать символьную скорость в 8–9 раз), а число позиций сигнала (возможных комбинаций единиц и нулей) в сигнальном пространстве может достигать 256–512 штук.

QAM имеет один главный недостаток. Он заключается в том, что передаваемый сигнал кодируется одновременными изменениями

амплитуды двух компонентов несущего гармонического колебания, которые сдвинуты по фазе друг относительно друга на π/2. Поэтому при использовании QAM высокочастотные тракты передатчика и приемника должны быть высоколинейными. Энергетические показатели передатчика при этом существенно хуже, чем при использовании сигналов с постоянной огибающей.

Многопозиционная (многоуровневая) частотная модуляция M-FSK формируется, как и другие многопозиционные виды модуляции, путем группировки $k = \log_2 M$ бит в символы и введением взаимно-однозначного соответствия между множеством значений символа и множеством значений частоты модулированного колебания. При этом значения возможных частот отличаются на одинаковую величину $2\Delta\omega_{max}$ – удвоенное значение величины девиации.

Информационный сигнал M-FSK является полярным, как и для FSK. Очевидно, что для того, чтобы значения частоты отличались на одинаковую величину, разность между значениями символов информационного сигнала должна быть одинаковой. Например, для сигнала 4-FSK множеству значений символов исходного информационного сигнала {00, 01, 10, 11} ставится во взаимно однозначное соответствие множество значений модулирующего сигнала c(t) {-3, -1, 1, 3}.

В случае FSK, чем больше индекс модуляции, тем больше разность частот модулированного сигнала, тем проще различить значения символов в приемнике (меньше вероятность ошибки), но тем больше ширина спектра сигнала. На практике для FSK используются значения $0.1 \le m \le 1$. При $m \ge 0.5$ значение вероятности битовой ошибки перестает уменьшаться монотонно с увеличением m, а осциллирует ё с затуханием в окрестности постоянного значения. На рис. 9 показан спектр сигнала FSK с непрерывным изменением фазы и индексом 0.5. Он обладает наибольшей спектральной эффективностью. Метод FSK с индексом модуляции $m = 0.5$ называется частотной модуляцией с минимальным сдвигом MSK (Minimum Shift Keying).

Для ограничения спектра сигналов FSK и MSK чаще всего применяется Гауссов baseband-фильтр, предназначенный для устранения влияния внеполосных помех и максимизация отношения сигнал/шум. Соответствующие типы модуляции называются GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) и GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying, используется в стандарте GSM). В отличие от фильтра с характеристикой приподнятого косинуса, фильтр Гаусса не обеспечивает отсутствие межсимвольной интерференции, однако вносит малый уровень межсимвольных искажений. Возможность его применения обусловлена тем, что baseband-фильтр является не

единственным источником межсимвольной интерференции в системе связи. Распространение радиоволн в городе или зданиях ввиду многолучевого характера распространения приводит часто к уровню межсимвольной интерференции, превышающему значения, вносимые фильтром (правда, применение специальных схем модуляции и (или) разнесенного приема позволяет существенно снизить влияние многолучевости, в таких системах лучше применять фильтры Найквиста). Кроме этого, искажения в аналоговых трактах и антенных системах также приводят к некоторому уровню межсимвольной интерференции. Гауссов фильтр требует существенно меньшей длины импульсной характеристики КИХ-фильтра по сравнению с фильтром приподнятого косинуса для одинакового уровня подавления побочных составляющих спектра. Поэтому он обладает существенно большей вычислительной эффективностью.

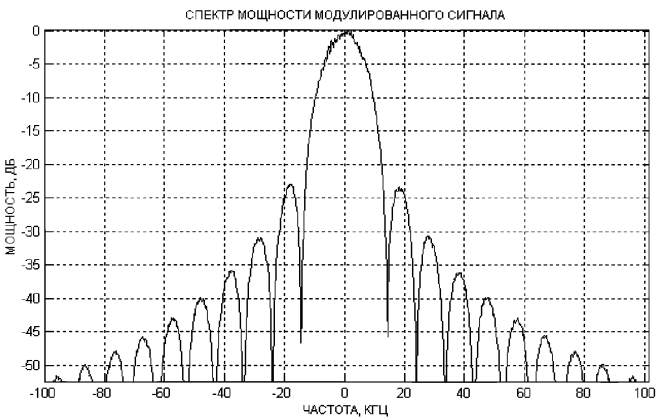

Рис. 9. Спектр сигнала FSK с непрерывным изменением фазы и индексом 0.5.

Помимо модулирования несущей при передаче информации по радиоканалу можно одновременно применять её помехоустойчивое кодирование, повышая тем самым надёжность системы в целом.

Любой помехозащищенный код характеризуется относительной скоростью кода (R).

Определение. Если кодовая комбинация содержит n- бит, и из них к- информационных бит, тогда R= k/n.

Разработчику необходимо найти компромисс между увеличением исправляющей способности кода (избыточности) и снижению энергии на бит информации.

Для каждого канала передачи данных (типов действующих помех) и длин кодовых комбинаций есть свой оптимум величины R, приведённый на рисунке 10.

В настоящее время стали популярны такие помехозащищенные коды, как сверточные, Рида – Соломона, коды с малой плотностью проверок на четность (Low-Density Parity-Check–LDPC), турбокоды. Однако в ситуации, когда неизвестна электромагнитная обстановка в конкретной местности, где будет развертываться РСПИ, необходимо ориентироваться как на «белый» шум в канале передачи, так и на импульсные помехи от сторонних радиосредств. Поэтому код должен успешно исправлять как одиночные ошибки, так и блочные ошибки (поражаются несколько бит подряд).

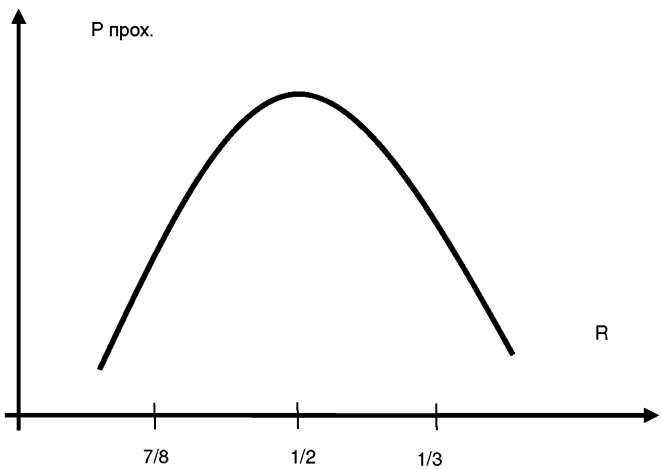

Рис. 10. Вероятность прохождения извещения в зависимости от избыточности кода для РСПИ

Поэтому при всем богатстве выбора помехозащищенных кодов в РСПИ чаще всего применяют коды Хэмминга или Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ). Остальные коды или плохо работают с блочными ошибками (например, сверточные коды), или у них достаточно сложен алгоритм декодирования, или они рассчитаны на длину кодовой посылки в 500–1000 бит. Коды Рида – Соломона являются недвоичными кодами.

Классификация кодов, применяемых для защиты от помех при передаче информации, приведена на рис. 11.

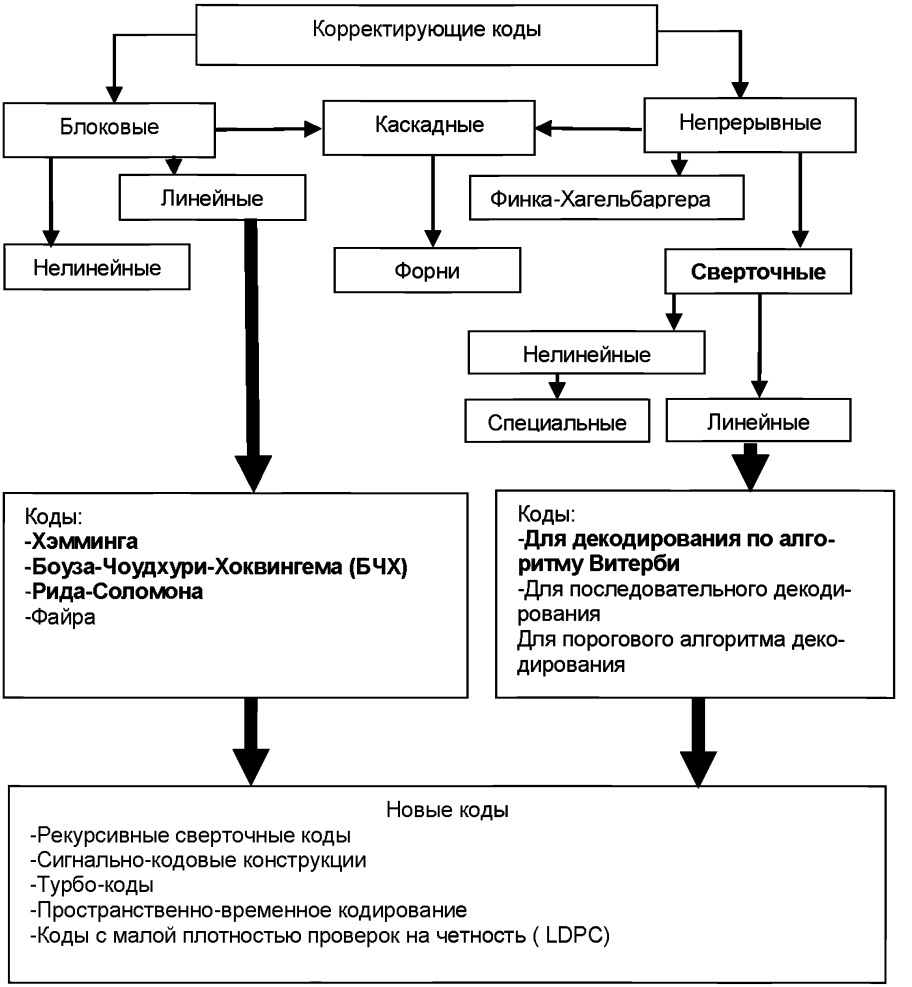

Рис.11 Классификация помехоустойчивых кодов

В РСПИ из-за вида модуляции и принципа построения не применимы сигнально-кодовые конструкции или пространственно-временное кодирование и т. д.

Отдельно стоит рассмотреть схему треллис-модуляции (кодированная модуляция или решётчатая кодированная модуляция, TCM (trellis coded modulation) — метод совместного кодирования и манипуляции, при котором улучшается спектральная эффективность сигнала по сравнению с раздельным способом.

Треллис-модуляция применяется в высокоскоростных модемах для модуляции несущей. Ценой сравнительно небольшой избыточности — добавлением треллис-бита — повышается помехоустойчивость передачи. На принимающем модеме для анализа поступающих последовательностей битов используется специальный декодер, так называемый декодер Витерби. Этот способ модуляции обеспечивает скорость передачи данных до 9600 бит/с и более. При использовании блочного или свёрточного кодирования помехоустойчивость радиосвязи повышается за счёт расширения полосы частоты и усложнения радиоаппаратуры без повышения отношения сигнал/шум (ОСШ).

Для сохранения помехоустойчивости при том же значении ОСШ, уменьшить используемую полосу частот и упростить радиоаппаратуру можно с помощью применения треллис-модуляции (ТСМ), которая впервые была разработана в 1982 году Унгербоком. В основе ТСМ лежит совместный процесс кодирования и модуляции.

Для примера рассмотрим использование данной схемы с QAM – модуляцией. Применение многопозиционной QAM в чистом виде сопряжено с проблемой недостаточной помехоустойчивости. Поэтому во всех высокоскоростных протоколах QAM используется совместно с решетчатым кодированием. Выбранная определенным образом комбинация конкретной QAM и помехоустойчивого кода в отечественной технической литературе носит название сигнально-кодовой конструкции (СКК), которая позволяет повысить помехозащищенность передачи информации одновременно со снижением требований к отношению сигнал-шум на 3-6 дБ. Это объясняется увеличением вдвое числа сигнальных точек за счет добавления к информационным битам одного избыточного, образованного путем сверточного кодирования. Расширенный, таким образом, блок битов подвергается все той же QAM. В процессе демодуляции принятый сигнал декодируется по алгоритму Витерби. Именно этот алгоритм за счет введенной избыточности и знания предыстории процесса приема позволяет по критерию максимального правдоподобия выбрать из сигнального пространства наиболее достоверную точку.

Все применяемые сегодня СКК используют сверточное кодирование со скоростью $(n\text{-}1)/n$, т.е. при передаче одного сигнального элемента используется только один избыточный двоичный символ. Типичная схема сверточного кодирования со скоростью, равной 2/3, приведена на рис. 12.

В схеме, представленной на рисунке 10, сверточный кодер с относительной скоростью кода, равной 2/3, используется совместно

модулятором ФМ-8. Каждым двум информационным битам на входе кодер сопоставляет трехсимвольные двоичные блоки на выходе, которые поступают на модулятор ФМ-8.

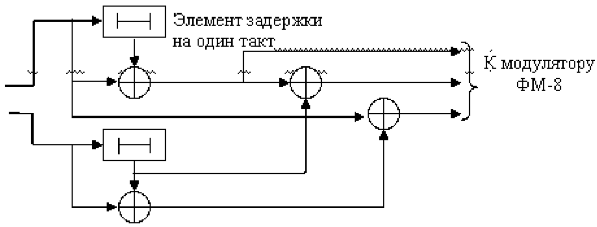

Рис.12 Схема сверточного кодера с относительной скоростью кода, равной 2/3.

5 Современные методы организации радиосвязи

Кроме современных комбинированных методов модуляции радиосигналов стоит рассмотреть и новые методы организации связи, такие как COFDM – ортогональное частотное разделение каналов с кодированием, FHSS – расширение спектра методом частотных скачков, DSSS – расширение спектра методом прямой последовательности. Здесь приведена только малая часть видов модуляции, и способов организации связи.

Все эти методы относятся к схеме, так называемой широкополосной модуляции, основная идея которой состоит в разбиении информации перед беспроводной передачей на управляемые фрагменты.

Одной из разновидностью широкополосной модуляции является способ разделения передаваемой информации по нескольким радиоканалам с разными частотами. Обычно таких частот около 70 и информация передается по всем или большинству из них, а затем на принимающем конце радиосистемы демодулируется или объединяется.

Способ модуляции с одновременным использованием нескольких несущих частот, имеющий название OFDM (способ с мультиплексированием ортогональных частот). Основная идея, положенная в основу этого способа, заключается в следующем. Передаваемый цифровой поток модулирующего сигнала «распараллеливается» и передается по нескольким каналам – путем модуляции нескольких несущих. Число этих несущих выбирается так, чтобы необходимым

образом сократить скорость передачи информации на каждой отдельной несущей.

В результате достигается главное – на передачу одного символа на каждой отдельной несущей может быть отведено большее время. Настолько большее, чтобы сделать передачу каждого символа независимой от наличия отраженных сигналов, обусловленных так называемым «многолучевым» распространением радиоволн, что достаточно характерно для городских условий.

На рисунке 12 показан пример преобразования («распараллеливания») одного последовательного цифрового сигнала в пять отдельных сигналов путем демультиплексирования, что позволяет увеличить длительность передачи символа в каждом из пяти сигналов в пять раз. Далее, каждый из полученных таким образом сигналов с уменьшенной скоростью передачи символов модулирует соответствующую несущую, число которых равно числу модулирующих сигналов.

При этом допускается фазовая (PSK) или квадратурная амплитудная (QAM) модуляция каждой несущей. Сами несущие частоты при этом выбираются из следующих соображений:

– число несущих должно быть таким, чтобы при неизменной скорости потока данных на входе модулятора OFDM увеличить до требуемой величины время передачи одного символа на каждой несущей;

– несущие должны быть достаточно близки по частоте друг к другу, чтобы сократить занимаемую полосу частот канала связи;

– частоты несущих должны быть выбраны так, чтобы они не создавали взаимных помех.

Последнее условие выполняется, если частоты удовлетворяют требованию ортогональности. Физический смысл этого требования заключается в следующем: спектр каждой несущей после модуляции должен иметь «нули» на частотах, на которых расположены остальные несущие. Выполнение этого условия обеспечивает отсутствие взаимных помех и независимую передачу информации на каждой несущей.

$$T_{GS} = T_G + T_S$$

где T_{GS} – время, затрачиваемое на передачу одного символа; T_S – время передачи полезной информации.

Важным фактором при таком способе модуляции является так называемая «межсимвольная интерференция» (ISI), или, по существу, перекрестные искажения. Модуляция OFDM позволяет применить простой прием для борьбы с этим явлением: при увеличении количества несущих частот время на передачу одного символа также увеличивает-

ся. Этого увеличения оказывается достаточно для того, чтобы ввести между передаваемыми символами так называемый «защитный интервал». В пределах защитного интервала передается как бы возвращённая назад во времени копия последующей части символа. Правильный выбор длительности защитного интервала позволяет в определенных пределах устранить помехи, вызываемые эхо – сигналами.

На рис.14 показан пример назначения защитного интервала.

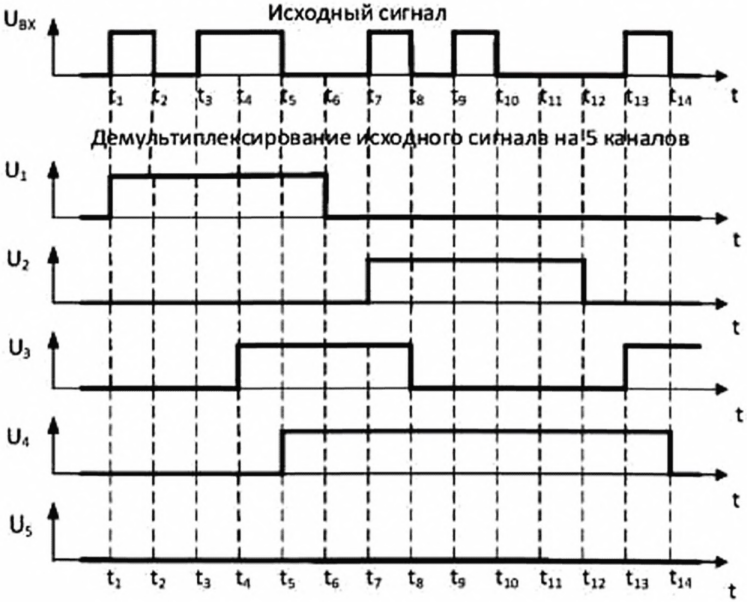

Рис.13 Пример демультиплексирования сигнала в схеме OFDM

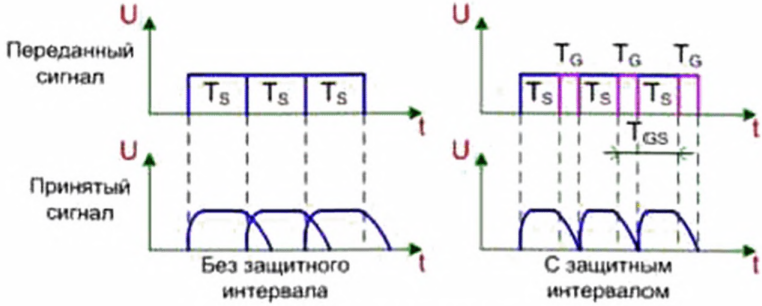

Рис. 14 Назначение защитного интервала

Примерная структурная схема модулятора OFDM показана на рисунке 15. Для формирования каждой из используемых несущих частот необходим свой задающий генератор. Так может осуществляться способ модуляции OFDM при небольшом количестве несущих, однако применительно к передаче цифрового ТВ сигнала количество несущих частот на выходе модулятора может составлять несколько тысяч, поэтому при построении модулятора было найдено оригинальное решение, позволившее избежать изготовления такой многоканальной системы передачи. Дело в том, что каждая несущая ответственна за соответствующую часть общего спектра сигнала на выходе модулятора. В радиотехнике известен прием синтеза сложного сигнала из отдельных гармонических составляющих. Таким приемом является обратное преобразование Фурье. Существуют хорошо отработанные алгоритмы, позволяющие использовать такие преобразования в минимальное время и с минимальными вычислительными затратами.

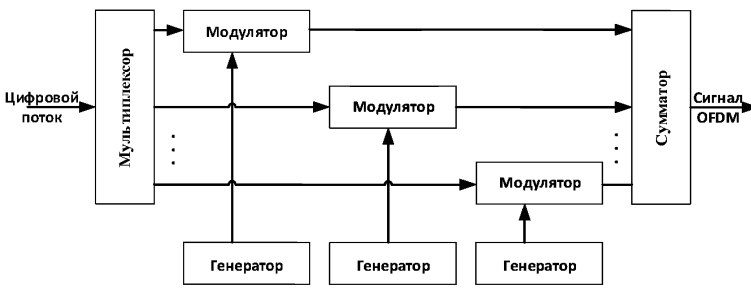

Рис.15 Структурная схема модулятора OFDM

На рис. 16 показан пример формирования сигнала OFDM с помощью обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ), которому подвергается входной цифровой поток. После ОБПФ обе части вычисленного преобразования, вещественная и мнимая, переводятся в аналоговую форму, проходя ЦАП и ФНЧ для удаления высокочастотных продуктов, затем поступают в преобразователь частоты, где умножаются соответственно на основной и квадратурный сигналы – гармоническое колебание частоты f_0. Это позволяет после сумматора получить спектр сигнала OFDM, смещенный на частоту f_0. Такая операция соответствует преобразованию частоты, необходимому при формировании радиосигнала для выбранного канала вещания.

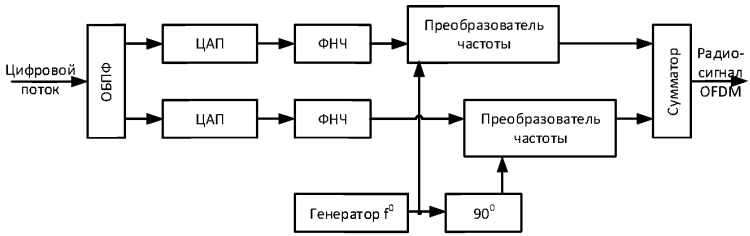

Рис.16. Формирования сигнала OFDM с помощью обратного быстрого преобразования Фурье

Один из вариантов способа модуляции OFDM, известный под названием COFDM, предполагает «перемешивание» передаваемых символов во времени таким образом, что следующие друг за другом символы полезной информации на передающей стороне модулируют те несущие, номера которых предписываются специальной заранее определенной последовательностью.

В основе реализации второго базового принципа COFDM лежат сверточное кодирование, декодирование по принципу максимального правдоподобия (алгоритм Витерби) с мягкими решениями, а также перемежение по частоте и по времени. Система модуляции с перемежением предполагает перераспределение элементов потока данных по времени и частоте, в результате чего последовательные отсчеты передаваемого сигнала подвергаются независимым замираниям. Эффективность алгоритма Витерби максимальна в канале с независимыми ошибками и именно перемежение обеспечивает декорреляцию ошибок. Заметим, что при стационарном приеме разнос в частотной области является единственным средством обеспечения успешного приема, поскольку временной разнос в этом случае не помогает.

Эта последовательность точно выдерживается на передающей стороне и, в обратном порядке – в приемном устройстве. Такая мера позволяет сделать данный способ передачи информации практически нечувствительным к различного рода замираниям, а также помехам, исключающим на короткое время возможность использования какого-либо участка диапазона частот.

Для минимизации возможности перехвата или подавления узкополосным шумом радиообмена был предложен метод ведения передачи с постоянной сменой несущей в пределах широкого диапазона частот или расширения спектра скачкообразной перестройкой частоты – FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum).

В результате мощность сигнала распределяется по всему диапазону, и прослушивание какой-то определенной частоты даёт только небольшой шум. Последовательность несущих частот является псевдослучайной, известной только передатчику и приемнику. Попытка подавления сигнала в каком-то узком диапазоне также не слишком ухудшает сигнал, так как подавляется только небольшая часть информации. Реализация метода споследовательностью перестройки частот (F7→F3→F4→F1→F10→F6→F2→8→F5→F9→F7) показана на рисунке 17. В течение фиксированного интервала времени передача ведется на неизменной несущей частоте. На каждой несущей частоте для передачи дискретной информации применяются стандартные методы модуляции, такие как FSK или PSK. Для того чтобы приемник синхронизировался с передатчиком, для обозначения начала каждого периода передачи в течение некоторого времени передаются синхробиты. Так что полезная скорость этого метода кодирования оказывается меньше из-за постоянных накладных расходов на синхронизацию.

Несущая частота меняется в соответствии с номерами частотных подканалов, вырабатываемых алгоритмом псевдослучайных чисел. Псевдослучайная последовательность зависит от некоторого параметра, который называют начальным числом. Если приемнику и передатчику известны алгоритм и значение начального числа, то они меняют частоты в одинаковой последовательности, называемой последовательностью псевдослучайной перестройки частоты.

Не менее эффективным в плане устойчивости к помехам является метод прямой последовательности для расширения спектра – DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) – широкополосная модуляция с прямым расширением спектра. Это метод формирования широкополосного радиосигнала, при котором исходный двоичный сигнал преобразуется в псевдослучайную последовательность, используемую для модуляции несущей.

В отличие от метода FHSS, весь частотный диапазон занимается не за счет постоянных переключений с частоты на частоту, а за счет того, что каждый бит информации заменяется N-битами, так что тактовая скорость передачи сигналов увеличивается в N раз. А это, в свою очередь, означает, что спектр сигнала также расширяется в N раз. Достаточно соответствующим образом выбрать скорость передачи данных и значение N, чтобы спектр сигнала заполнил весь диапазон.

Цель кодирования методом DSSS та же, что и методом FHSS – повышение устойчивости к помехам. Узкополосная помеха будет искажать только определенные частоты спектра сигнала, так что приемник с большой степенью вероятности сможет правильно распознать передаваемую информацию.

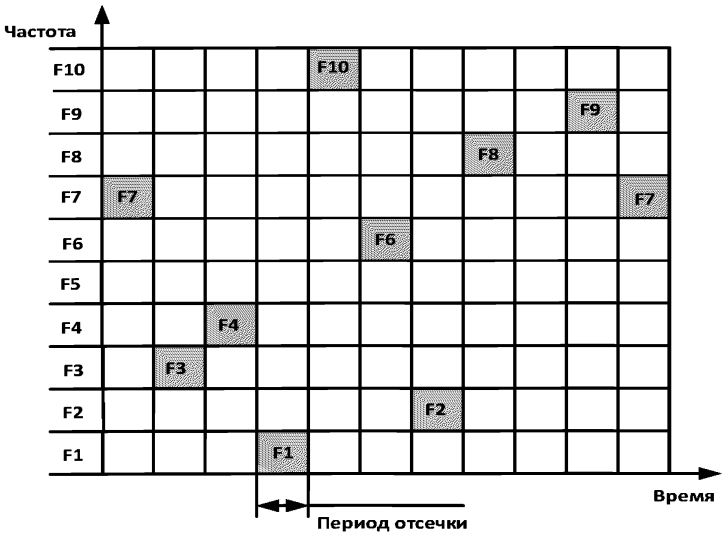

Рис. 17. Последовательность перестройки частот в схеме FHSS

Код, которым заменяется двоичная единица исходной информации, называется расширяющей последовательностью, а каждый бит такой последовательности – чипом. Соответственно, скорость передачи результирующего кода называют чиповой скоростью. Двоичный нуль кодируется инверсным значением расширяющей последовательности. Приемники должны знать расширяющую последовательность, которую использует передатчик, чтобы понять передаваемую информацию.

Количество битов в расширяющей последовательности определяет коэффициент расширения исходного кода. Как и в случае FHSS, для кодирования битов результирующего кода может использоваться любой вид модуляции, например BFSK.

Чем больше коэффициент расширения, тем шире спектр результирующего сигнала и выше степень подавления помех. Но при этом растет занимаемый каналом диапазон спектра. Обычно коэффициент расширения имеет значение от 10 до 100.

Беспроводные локальные сети DSSS используют каналы шириной 22 МГц, благодаря чему многие WLAN могут работать в одной и той же зоне покрытия. В Северной Америке и большей части Европы, в том числе и в России, каналы шириной 22 МГц позволяют создать в диапазоне 2,4 – 2,473 ГГц три неперекрывающихся канала

передачи. Новые методы организации связи (в первую очередь DSSS и FHSS) при их использовании обеспечат РСПИ следующие преимущества:

– высокую помехозащищенность от узконаправленных помех естественного или искусственного происхождения: поражается только малая часть спектра передаваемого сигнала;

– скрытность передачи информации: трудно обнаружить сам факт передачи информации;

– автоматическую защиту передаваемой информации: в DSSS для декодирования необходимо знать последовательность, используемую для прямого расширения спектра, в FHSS – закон изменения частоты;

– возможность работать на вторичном частотном ресурсе.

К недостаткам DSSS и FHSS следует отнести:

– необходимость иметь для работы широкую полосу частот (обычно от 500 кГц до нескольких МГц);

– сложность реализации;

– необходимость обеспечивать для DSSS жесткую временную синхронизацию при работе всех приемопередатчиков в системе.

К достоинствам метода OFDM следует отнести устойчивость к замиранию полезного сигнала, что достаточно характерно для городских условий, повышенную помехозащищённость канала связи, спектральную эффективность метода организации связи.

6 Сравнительный анализ различных методов модуляции

Принято считать, что основными критериями эффективности различных видов модуляции являются критерии спектральной и энергетической эффективности. Энергетическая эффективность характеризует энергию, которую необходимо затратить для передачи информации с заданной достоверностью (вероятностью ошибки). Спектральная эффективность характеризует полосу частот, необходимую для того, чтобы передавать информацию с определенной скоростью. Кроме данных критериев, виды модуляции сравниваются по устойчивости к различным типам помех и искажений и сложности аппаратной реализации. Существуют также специфические критерии, существенные для отдельных систем связи, отражающие особенности канала связи.

Практически во всех системах связи используются фильтры, ограничивающие спектр сигнала. Для амплитудных, фазовых и ам-

плитудно-фазовых видов модуляции чаще всего используется фильтр с характеристикой приподнятого косинуса, для частотных – гауссов фильтр. Таким образом, спектральная эффективность для амплитудных, фазовых и амплитудно-фазовых видов модуляции одинакова и определяется полосой фильтра. Увеличение позиций (уровней) модуляции (модуляции M-ASK, M-PSK и M-QAM) увеличивает спектральную эффективность в $k = \log_2 M$ раз. Наибольшей спектральной эффективностью среди частотных видов модуляции обладает модуляция MSK. Сравнение MSK с гауссовой фильтрацией (модуляция GMSK) и относительной полосой BTb = 0.3 и модуляции QPSK с фильтром приподнятого косинуса с коэффициентом скругления $\alpha = 0.35$ (оптимальные для многих систем связи параметры) выявляет, что 99% мощности содержится в относительной полосе 1 для QPSK и 2.6 для GMSK.

Сравним виды модуляции по критерию энергетической эффективности. Для этого оценим для каждого вида модуляции требуемую энергию для передачи информации с одинаковой вероятностью ошибки на бит (BER).

$$BER = f\left[\frac{E_b}{N_o}\right]$$

где BER – вероятность ошибки на бит; E_b – энергия, необходимая для передачи одного бита информации; N_o – спектральная плотность мощности белого шума в канале.

В таблице 2 приводятся зависимости вероятности ошибки на бит от отношения E_b / N_o для различных видов модуляции.

Из таблицы видно, что с увеличением позиционности модуляции, вероятность битовой ошибки увеличивается (смотри, например, формулы M-ASK и M-PSK).

Таким образом, как правило, при увеличении спектральной эффективности помехозащищенность уменьшается.

Однако BER для BPSK и QPSK описываются одинаковыми формулами, при этом QPSK в 2 раза спектрально эффективнее, чем BPSK. Следовательно, QPSK всегда существенно эффективнее, чем BPSK, и, обыкновенно, имеет смысл использовать QPSK, а не BPSK. Физически, это объясняется тем, что в случае QPSK добавляется дополнительная степень свободы: квадратурная составляющая Q(t).

В случае BPSK используется только синфазная составляющая I(t). Квадратурная форма когерентного фазового демодулятора приводит к тому, что два канала детектора обеспечивают независимый прием двух бинарных фазомодулированных сигналов. Аналогичное явление имеет место и при сравнении модуляций DBPSK и DQPSK. Хотя выражения для BER несколько отличаются, с высокой степенью

приближения они совпадают. Модуляции с относительным кодированием имеют небольшой энергетический проигрыш по сравнению с обыкновенными BPSK и QPSK (0.3 – 0.9 дБ). DBPSK с некогерентным детектированием также имеет небольшой проигрыш по сравнению с DBPSK с когерентным детектированием (около 0.5 дБ). Под энергетическим выигрышем понимается разница в значении Eb /N_0 при одинаковом значении вероятности ошибки на бит. Имеет смысл сравнивать виды модуляции с одинаковым числом позиций. Сравним двухуровневые OOK, BPSK и MSK. Как видно из табл.2, OOK и MSK имеют одинаковую эффективность и уступают BPSK (и, соответственно, QPSK) по энергетической эффективности приблизительно 3 дБ.

Таблица 2

№ п/п	Вид модуляции	Вероятность ошибки на бит (BER)
1.	OOK	$Q_{(x)}\sqrt{E_b/N_0}$
2.	AM	$Q_{(x)}(\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{E_b/N_0})$
3.	FSK	$Q_{(x)}\sqrt{E_b/N_0}$
4.	MSK	$Q_{(x)}\sqrt{E_b/N_0}$
5.	QPSK	$Q_{(x)}(\sqrt{2}\sqrt{E_b/N_0})$
6.	QAM код Грея	$\frac{2P_0 - P_0^2}{\log_2 M}$ где $P_0 = \frac{2(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}} Q_{(x)}[\sqrt{\frac{3\log_2 MEb}{(M-1)N0}}]$

где E_b – энергия, необходимая для передачи одного бита информации; N_0 – спектральная плотность мощности белого шума в канале.

$Q_{(x)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_x^{\infty} e^{-t^2/2}dt$ – интеграл ошибок;

M – число позиций для многопозиционных видов модуляции.

На рисунке 18 показаны сравнительные графики энергетической эффективности OOK и BPSK.

По результатам данного сравнения можно сделать вывод о том, что при числе уровней до 4 включительно QPSK является спектрально и энергетически наиболее эффективным видом модуляции.

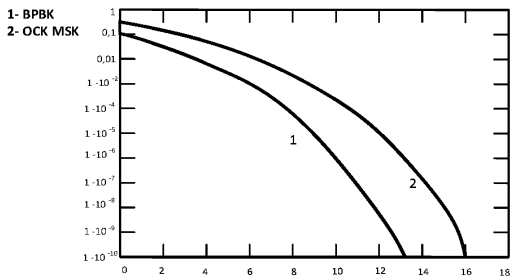

Рис. 18 Сравнение энергетической эффективности модуляций OOK и BPSK

Однако, здесь следует сделать одно существенное замечание относительно модуляции GMSK. Ее спектральная эффективность ниже, чем QPSK, в системах с линейным усилением, но GMSK, как частотный вид модуляции, позволяет использовать высокоэффективные нелинейные усилители и ограничители, что дает энергетический выигрыш. При прохождении QPSK через подобные устройства, ее спектр расширяется (происходит некоторое восстановление боковых лепестков). Поэтому, в некоторых случаях, GMSK может иметь большую эффективность, чем QPSK. В частности в стандарте GSM выбор сделан в пользу GMSK, а в CDMA – QPSK.

Сравним теперь методы модуляции с числом уровней M>4. Амплитудная модуляция существенно (более 10 дБ при M=16) уступает фазовой и амплитудно-фазовой.

При сравнении M–PSK с M–QAM, M–QAM превосходит по эффективности MPSK, причем энергетический выигрыш M–QAM увеличивается с ростом M. Например, для M=16 выигрыш составляет около 4 дБ, а при M=64 около 10 дБ. Физически это объясняется тем, что расстояние между соседними точками в сигнальном созвездии M-PSK меньше, чем M-QAM.

Сигнальное созвездие M–PSK представляет собой окружность с равномерно распределенными на ней точками, а созвездие M–QAM – квадрат с равномерно распределенными по его площади точками. Чем больше расстояние между точками в созвездии, тем менее вероятна ошибка в детектировании соседнего символа. Многопозиционная частотная модуляция используется гораздо реже, так как при увеличении числа уровней и сохранении индекса модуляции ее

спектр не сужается, а расширяется, ввиду того, что вводятся новые частоты и ширина спектра растет по закону:

$$M/\log_2 M$$

Таким образом, при ограниченной полосе, при M ≤ 4 наиболее эффективной является модуляция QPSK, а при M > 4 – QAM. QPSK является частным случаем QAM при M=4. Можно считать QAM наиболее эффективным видом модуляции при любом числе уровней. Еще больший выигрыш по сравнению с обыкновенными QPSK и QAM дают их усовершенствованные модификации, такие, как модификации Феера (FQPSK, FQAM), модуляция с решетчатым кодированием (TCM).

Рассматривая комбинированные методы модуляции, в первую очередь QAM, следует отметить их высокую помехозащищенность.

В настоящее время амплитудные виды модуляции в РСПИ использовать не рекомендуется из-за их низкой потенциальной помехоустойчивости.

Использование FSK оправдано при низких скоростях передачи данных в РСПИ с целью удешевления производимого оборудования. При ограничении по ширине используемого канала и высоким требованиям к внеполосным излучениям необходимо использовать GFSK и GMSK.

При использовании фазовой модуляции наибольшее внимание заслуживает QPSK.

Однако, наиболее современным и перспективным видом модуляции является QAM в сочетании со сверточным кодированием.

7 Обзор и анализ элементной базы для реализации современных методов модуляции в РСПИ на отечественном и зарубежном рынке

Отечественная электронная промышленность выпускает в основном радиомодемы, выполненные в виде отдельного законченного конструктива. Микросхемы трансиверов и синтезаторов для систем узкополосной радиосвязи выпускают лишь несколько предприятий, занимающихся производством микроэлектроники. Наиболее известна и востребована продукция АО НПЦ «ЭЛВИС» и АО «ПКК Миландр».

АО НПЦ «ЭЛВИС» г. Зеленоград выпускает микросхемы прямого цифрового двухканального синтезатора частоты (DDS) 1508ПЛ8Т,

предназначенную для синтеза прямоугольных и гармонических немодулированных и модулированных сигналов в полосе частот до 350 МГц (квадратурных сигналов в полосе частот до 700 МГц), используемых в системах связи и радиолокации. Изделие 1508ПЛ8Т входит в состав серии высокочастотных микросхем «Флекс Радио», разрабатываемых АО НПЦ «ЭЛВИС» на базе стандартной коммерческой КМОП технологии с проектными нормами 0,18-мкм.

По совокупности реализованных функций синтеза и разнообразию интерфейсов управления и передачи данных данный синтезатор превосходит свои аналоги фирмы Analog Devices (AD9952, AD9858, AD9854, AD9852, AD9850, AD9830), а по параметрам встроенных ЦАП не уступает AD9858 и другим подобным изделиям. Энергопотребление микросхем 1508ПЛ8Т существенно меньше, чем у аналогичных по классу устройств.

В микросхеме реализованы следующие типы модуляции: линейно-частотная (ЛЧМ), частотная (ЧМ), фазовая (ФМ), амплитудная (АМ), квадратурная, а также их комбинации, включая QAM–64.

В состав микросхемы входит быстродействующий компаратор и встроенный 10-разрядный ЦАП 800 МГц (до 1 ГГц). Предусмотрена возможность работы микросхем совместно с внешними схемами ФАПЧ и ГУН для синтеза ЛЧМ–сигналов в диапазоне до нескольких гигагерц с сохранением высокой точности и скорости перестройки частоты. Интерфейс синхронизации нескольких микросхем обеспечивает возможность применения ЦВС в системах с ФАР и ААР.

Кроме того, предприятием производится четырехканальный цифровой SDR-приемник (DDC, Digital Down Converter) – микросхема 1288ХК1Т. Микросхема 1288ХК1Т предназначена для построения приемных трактов систем радиосвязи и радиолокации. В 1288ХК1Т реализованы функции преобразование входного сигнала с промежуточной частоты на низкую частоту с последующей фильтрацией и децимацией сигнала. Применение цифровой обработки сигнала на промежуточной частоте позволяет снизить требования к аналоговому тракту и упростить реализацию и/или улучшить производительность системы в целом. Производительность микросхемы достаточна для обработки четырех каналов узкополосной связи или одного канала широкополосной связи. На базе микросхемы 1288ХК1Т можно реализовать программно-перенастраиваемые фазированные и адаптивные антенные решетки, включая технологии «Smart Antenna» и MIMO.

Цифровой приемник 1288ХК1Т содержит четыре идентичных канала, реализующих функции гетеродинирования, децимации и канальной фильтрации входного сигнала.

Каждый из четырех каналов цифровой обработки включает цифровой гетеродин (NCO,X), два каскада фильтров-дециматоров с постоянными коэффициентами (CIC2, CICN), два каскада программируемых КИХ-фильтров-дециматоров 64-го порядка (DFIR64) и комплексный умножитель выходного сигнала (FGAIN).

Цифровой квадратурный гетеродин обеспечивает перенос спектра входного действительного сигнала с промежуточной частоты на низкую частоту, умножая отсчеты входного сигнала на отсчеты опорного сигнала. В гетеродине реализовано управление частотой и фазой опорного сигнала. Фильтры-дециматоры с фиксированными коэффициентами предназначены для предварительной децимации сигнала. Фильтры построены как фильтры с единичными коэффициентами (CIC — cascaded integrator comb). Применение этих фильтров эффективно при больших значениях коэффициента децимации. При необходимости, эти фильтры могут быть выключены.

В 1288ХК1Т предусмотрена синхронизация работы нескольких микросхем, включая синхронный пуск, останов, очистку блоков обработки, установку параметров гетеродина и комплексного выходного умножителя. Синхронизация нескольких микросхем позволяет использовать MF01 в системах ФАР и ААР. Кроме этого, реализована функция параллельной конфигурации нескольких микросхем.

Вывод обработанного сигнала осуществляется через 16 или 32 бит параллельный порт или 4 или 8 бит линк–порт, управление осуществляется с помощью последовательного или параллельного порта. Разнообразие интерфейсов и режимов их работы, а также наличие встроенного буфера на 512 выходных отсчетов позволяют подключать MF01 к различным микропроцессорам и микроконтроллерам без использования дополнительной логики.

Таблица 3 – Сравнение 1288ХК1Т с зарубежными микросхемами

	1288ХК1Т	AD6620	AD6634	GC4016
Количество каналов обработки	4	1	4	4
Количество независимых 16-битных входов	4	1	2	3
SFDR гетеродина, ДБ	>100	>100	>100	>100
Каскады CIC децимации	CIC2+CIC4-6	CIC2+CIC5	CIC2+CIC5	CIC4
КИХ–фильтр–корректор	64 порядка	нет	нет	

Фирмой АО «ПКК Миландр» г. Зеленоград производится многокристальная сборка для цифрового DRM-приемника «Дуэт». Микро-

сборка представляет собой платформу для построения стационарных и мобильных радиоприемных устройств AM- и DRM-диапазонов, может применяться в перспективных радиоприемных устройствах, обеспечивающих качественный прием удаленных широковещательных радиостанций. Формат DRM позволяет принимать потоки аудиоинформации, текстовых сообщений, графической информации. Микросборка имеет низкое потребление, обеспечивающее продолжительную автономную работу.

В состав многокристальной сборки входят:

Аналого-цифровой преобразователь 5101НВ015;

Цифровой процессор обработки сигналов с СФ–блоками 1967ВН034;

Преобразователи постоянного напряжения 1310ПН1У – 3 шт.;

Flash-память 1636РР1У;

Генератор опорной частоты;

Пассивные компоненты.

Краткие характеристики:

Диапазон рабочих частот: 520 кГц – 1,6 МГц AM; 100 кГц – 30 МГц DRM;

Режимы устойчивости: A, B, C, D;

Ширина полосы сигнала DRM: 4.5, 5, 9, 10, 18, 20 кГц;

Поддержка каналов передачи данных: FAC, SDC, MSC;

Способ модуляции DRM: ODFM (64-QAM hierarchical, non hierarchical, 16-QAM non hierarchical, 4-QAM);

Методы защиты от ошибок: сверточное кодирование, перемежение битов;

Прием текстовых сообщений: предусмотрен;

Выходные каналы приемника: UART, SPI, SSI, LCD-контроллер;

Потребляемая мощность: не более 1 Вт;

Потребляемая мощность в режиме ожидания: не более 0.2 Вт;

Рабочее напряжение: 5 ±10% В;

Диапазон рабочих температур: минус 60...+85 °С;

Тип корпуса: BGA, 234 вывода;

Габаритные размеры: 62x62 мм.

Также на АО «ПКК Миландр» г. Зеленоград разработано устройство формирователя модулирующего сигнала и освоен его серийный выпуск. Микросхема 1321 ХД2У (К1321 ХД2У, К1321 ХД2УК). 1321ХД2У является комбинацией целого набора аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей в составе системы цифрового радио и осуществляет критические цифровые обработки сигналов. Микросхема идеально подходит для построения узкополосной си-

стемы связи основанной на фазовой манипуляции. Гибкость в архитектуре микросхемы позволяет использовать ее и в системах связи ориентированных на модуляции, отличные от фазовой манипуляции. ЦАП, формирующий модулирующий сигнал, включает все функции для преобразования символов цифровых данных в аналоговые I и Q сигналы для внешнего переносчика частоты на несущую частоту. Максимальный битовый поток составляет 72 кбит/с, используя фазовую 4-х позиционную манипуляцию 4-DQPSK, или 108 кбит/с, используя 8-ми позиционную фазовую манипуляцию 8-D8PSK. Микросхема так же включает в себя АЦП коррекции мощности для оцифровки I и Q каналов с частотой выборки до 36 кГц.

Предприятие также выпускает радиоприемник 1321ХД1, позволяющий принимать и обрабатывать радиосигнал на частотах в диапазоне 10 – 300 МГц. Для усиления принятого сигнала и переноса его на промежуточную частоту используются встроенные малошумящий усилитель, смеситель и система ФАПЧ с дробным коэффициентом деления. В микросхеме реализована система АРУ с диапазоном 24 дБ, а также возможность ручной регулировки усиления МШУ в диапазоне до 15 дБ. Тактирование АЦП и блока цифровых фильтров осуществляется от внутренней ФАПЧ со встроенной активной частью ГУН. Микросхема позволяет обрабатывать сигнал с минимальным коэффициентом шума (КШ) в полосе до 25 кГц и в полосе до 200 кГц с некоторым ухудшением КШ.

Однако основная доля оборудования для организации радиоканальной связи в УКВ диапазонах 134-174 и 380 – 486 МГц приходиться на радиомодемы, выпускаемые в виде законченного конструктива.

Основные типы указанных радиомодемов отечественного производства, с их характеристиками приведены в таблице 4.

Прочерки в таблице говорят об отсутствии данных или данная возможность не реализована в устройстве.

Из таблицы видно, что радиомодемы обладают следующими характеристиками:

– рабочий диапазон частот приемопередатчиков большинства радиомодемов: 146 – 174 МГц, 440 – 470 МГц;

– мощность передатчика варьируется от 10 мВт до 10 Вт;

– виды модуляции: FSK, MSK, GMSK;

– скорости передачи данных изменяется от 1200 бит/с до 19200 бит/с.

В ряде модемов используется контроль четности и помехоустойчивые коды, исправляющие одну и или две ошибки.

Некоторые модемы имеют несколько модификаций в зависимости от места и способа их использования. По конструктивному исполнению радиомодемы выпускаются:

– в виде законченных блоков, включающих собственно модем и приемопередатчик;

– в раздельном оформлении передающей и приемной частей радиомодема;

– в виде приставки к радиостанции, подключаемой к микрофонному и телефонному входам радиостанции;

– в виде модуля, выполненного на отдельной плате, которая включается между компьютером и радиостанцией.

Таблица 4

Наименование	Рабочая частота	Вид модуляции	Скорость передачи	Способ кодирования	Выходная мощность	Чувствительность
«Мост» ОАО «ИРЗ» г.Ижевск	450 – 470 МГц	FSK	9600 бит/с	—	5; 10; 20 Вт	2 мкВ ($P_{ош} = 10^{-6}$)
«Эрика-ДМ» «Уральские заводы» г.Ижевск	146 – 174 МГц, 440 – 470 МГц	MSK	1200, 2400, 4800 Бод	—	0,5–4 Вт	—
«Струна 3» ООО НПП «Эльвира» г.Железнодорожный	166,7 – 167,5 МГц	MSK	до 4800 бит/с	—	1 Вт	0,3 мкВ
Спектр 96 ООО «Ратеос» г.Зеленоград	430 – 470 МГц	GMSK	4800, 9600 бод	код Хэмминга (12,8)	3,5 Вт	0,5 мкВ
Невод 1 ООО «Геолинк» г. Москва	433,92 Мгц	FSK	1200 бод	CRC; контрольная сумма	10 – 25 В	0,5 мкВ
Интеграл 160/2400 ЗАО «Интеграл +» г.Казань	136 – 174 МГц	FSK	2400, 4800 бит/с	—	2; 5 Вт	—
«Контакт-УТ-322» (ООО «Урал Телеком», г. Пермь)	433,92 ± 0,2% или к радиостанции	FFSK; GMSK	1200; 2400; 4800	—	10 мВт р/ст. 1 – 5 Вт	—
«Заря-ТМ232/450» (Государственный Рязанский приборный за-	433,92 ± 0,2%; 390 – 486	FSK; BPSK	1200; 2400; 4800	прозрачный, пакетный	0,01 – 2,5, 10 Вт	0,3 мкВ

вод, ГРПЗ)						
«Сократ» (ОАО «Завод «Автоприбор» г. Владимир)	146 – 174; 420 – 430; 433 – 434; 460 – 470	GMSK, DQPSK 1/4	1200 – 19 200 (28 800)	—	1 – 5 Вт	—

Зарубежный рынок микросхем радиомодемов более разнообразен как по типам используемой в них модуляции, так и по количеству производителей. Среди них можно выделить такие известные фирмы как CML Microcircuits, Analog Devices, Atmel, Texas Instruments и др.

CML Microcircuits ведущий разработчик и поставщик маломощных полупроводниковых решений для глобальных беспроводных и телекоммуникационных сетей. Среди многообразия изделий фирмы можно выделить микросхему CMX7163, которая обеспечивает функции 4/16/64-QAM на одном чипе, что позволяет исключить необходимость в DSP микроконтроллере и в микросхемах кодеков. Кроме того, вышеупомянутое решение включает в себя возможность обработки аналогового сигнала в широком динамическом диапазоне, цифровые полосовые фильтры, дополнительные кодеки, генератор тактовых импульсов, и все функции ввода/вывода, позволяющие уменьшить число компонентов и снизить стоимость финального решения. Высокий уровень интеграции решения снижает технические риски и минимизирует время выхода на рынок.

CMX7163 – это высокопроизводительное решение с высокой спектральной эффективностью QAM для узкополосых приложений. К ним относятся системы M2M с работой по выделенному каналу, цифровое Software Defined Radio (SDR), высокоскоростные беспроводные системы передачи данных и системы SCADA. Полудуплексное устройство, работающее с полосами пропускания 6.25kHz, 12.5 кГц и 25 кГц, работает со скоростью передачи данных до 96 Кбит/с с функциями оценки и выравнивания канала. Устройство обладает возможностью сопряжения с супергетеродинным приемником (например, CMX992) или с приемником прямого преобразования (например, CMX994), обеспечивающими соответствие таким строгим стандартам как EN 301 166, EN 300 113 и EN 302 561. Интерфейс передатчика совместим с проверенной технологией декартовой петли компании CML (CMX998).

Устройство использует собственную технологию компании CML – Firm ASIC. Подсистемы чипа конфигурируются специальным файлом функционального образа, который загружается при инициализации устройства и определяет набор функций, которые устройство будет выполнять. Функции устройства могут быть расширены путем обновления файла функционального образа.

Логический интерфейс CMX7163 обеспечивает адресуемые параметры конфигурации для упрощения разработки драйверов. Возможен выбор модуляции, скорости передачи и функции коррекции ошибок для различных применений без изменения аппаратной части.

Важными особенностями являются прямые аналоговые входы/выходы, автоматическая компенсация смещения, фильтрация формы импульса, возможность RAMDAC для контроля нарастания PA, последовательный интерфейс C-BUS (совместим с SPI) для работы с микроконтроллером. Четыре АПЦ и ЦАП, 2 программируемых выхода тактовых импульсов, 4 GPIO и отдельный интерфейс C-BUS (SPI) для реализации функции автоматического управления радио частью. Другими особенностями являются обнаружение несущей, автоматический контроль приемника AGC (при использовании CMX992 или CMX994).

Из продукции такого известного производителя радиоэлектроники, как Analog Devices, стоит выделить микросхему ADF7021-V. Высококачественный узкополосный ВЧ приемопередатчик с низким энергопотреблением, который построен на базе ADF7021-N. Архитектуры приемопередатчиков ADF7021-N и ADF7021-V похожи и отличаются только тем, что для достижения улучшенных показателей фазового шума в ADF7021-V интегрированный ВЧ синтезатор работает с внешним ГУН.

ADF7021-V предназначен для работы в не требующих лицензии диапазонах ISM и требующих лицензирования диапазонах на частотах от 80 МГц до 960 МГц.

Для минимизации сквозного прохождения ВЧ сигнала и уровня побочных излучений внешний ГУН работает на частоте в два или четыре раза выше желаемой частоты ВЧ сигнала. Максимальная поддерживаемая частота работы ГУН составляет 1920 МГц. Режим работы ГУН на учетверенной частоте программируется активацией дополнительного интегрированного делителя частоты на два, который не входит в состав контура ВЧ синтезатора и обеспечивает улучшенные показатели фазового шума.

Аналогично приемнику ADF7021-N приемный тракт ADF7021-V поддерживает работу с шириной полосы фильтра ПЧ 9 кГц, 13.5 кГц и 18.5 кГц, благодаря чему приемопередатчик идеально подходит для узкополосных систем передачи телеметрии в международных частотных диапазонах.

Для повышения эффективности использования спектра в узкополосных системах компонент имеет функции сглаживания передаваемых импульсов данных при помощи фильтра с гауссовской характеристикой или характеристикой приподнятого косинуса. Приемопередатчик может

применяться в системах, работающих в соответствии со следующими стандартами:

– Европейский стандарт ETSI EN 300 220;

– Североамериканские стандарты FCC Part 15, Part 90 и Part 95;

– Японский стандарт ARIB STD-T67;

– Корейские регламенты для устройств с малой дальностью действия;

– Китайские регламенты для устройств с малой дальностью действия;

Для построения на базе ADF7021-V полнофункционального приемопередатчика достаточно небольшого количества внешних дискретных компонентов, что делает его привлекательным для задач, где особенно важны малые габариты и высокие технические показатели.

Технические характеристики микросхемы приведены ниже:

– диапазоны рабочих частот при использовании внешнего ГУН: от 80 МГц до 960 МГц;

– улучшенные по сравнению с ADF7021-N показатели проникновения мощности в соседний канал (ACP) и избирательности по соседнему каналу (ACR);

– программируемая ширина полосы фильтра ПЧ: 9 кГц, 13.5 кГц и 18.5 кГц;

– алгоритмы модуляции: 2FSK, 3 FSK, 4FSK, MSK;

– сглаживание формы импульса: гауссовский фильтр и фильтр с характеристикой приподнятого косинуса;

– скорости передачи данных: от 0.05 кбит/с до 24 кбит/с;

– напряжение питания: от 2.3 В до 3.6 В.

Компания AXSEM, мировой лидер в разработке и производстве микросхем смешанных сигналов, производит один из лучших в индустрии интегральный приемопередатчик субгигагерцового диапазона AX5043 с чувствительностью -126 дБм на 1200 бод и 45 дБ подавления соседнего канала, потребляющий 9,5 мА в приеме.

Технические характеристики AX5043:

– ток в режиме приема 9,5 мА;

– чувствительность 126 дБм, подавление соседнего канала 45 дБ при скорости 1200 бод, канале 6,25 КГц на 868 МГц, FSK;

– низкое потребление без влияния на бюджет связи и избирательность;

– диапазон несущих частот 70..1050 МГц;

– стабильная выходная мощность (+-0,5 дБ) во всем диапазоне питающих напряжений (1,8..3,6 В) и рабочих температур (-40..+85С);

– автономный режим пробуждения по радио (wake-on-radio) – 500 нА;

– мощный полностью настраиваемый обработчик пакетов;

– поддержка протоколов обмена, в т.ч. HDLC и Wireless M-Bus (S, R, T).

Трансивер AX5043 является идеальным решением для узкополосных многоканальных радиосистем для работы на различных частотах, как открытых, так и лицензируемых. Микросхема имеет уникальную комбинацию параметров: высокая чувствительность, сверхнизкое энергопотребление, высокая избирательность. Бюджет связи в 143 дБм доступен без применения специальных методов кодирования данных, а включение аппаратной коррекции ошибок расширяет его до 146 дБм. Для работы в узкополосном режиме требуется термокомпенсированный тактовый генератор (16 МГц для большинства диапазонов), но приемопередатчик может работать и с обычным кварцем, если он обеспечивает требования по стабильности частот, рассчитан на работу от батарейного питания.

AX5043 поддерживает следующие алгоритмы модуляции: FSK, MSK, 4-FSK, GFSK, GMSK, AFSK и ASK. Максимальная выходная мощность – 16 дБм на 868 МГц и 20 дБм на 70 МГц.

Отличительные особенности:

– режим приёма и передачи без микроконтроллера;

– встроенная функция произвольного кадрирования обеспечивает поддержку большинства стандартов ISM и определяемых пользователем протоколов.

Из продукции фирмы Microchipможно выделить трансивер MRF49XA. Микросхема MRF49XA представляет собой Sub–GHz трансивер. Синтезатор частоты тактируется внешним кристаллом 10МГц и генерирует радиочастоты 433, 868 и 915МГц. Передатчик с прямым архитектурным преобразованием имеет типичную выходную мощность+7дБм. Аппарат работает в низковольтном диапазоне 2.2V ~ 3.8V, а в спящем режиме он потребляет очень низкой ток состояние, как правило, 0.3мкА.

Технические характеристики трансивера:

– частота 433MHz, 868MHz, 915МГц;

– скорость передачи данных (макс.) 256kbps;

– протокол модуляции FHSS, FSK;

– мощность выходная 7dbm;

– чувствительность -110dBm;

– напряжение питания 2.2В ~ 3.8В;

– ток приема 11мА;

– ток передачи 15мА;

– интерфейс данных PCB, поверхностный монтаж;

– вход для антенны PCB, поверхностный монтаж;

– температурный диапазон -40°С ~ +85°С.

К положительным свойствам можно следующие особенности микросхемы:

– наличие и поддержка собственных беспроводных протоколов Sub–GHz;

– наличие встроенного 10 МГц генератора;

– встроенный датчик низкого заряда аккумулятора;

– 4-х проводной последовательный периферийный интерфейс (SPI) совместимый интерфейс для связи с управляющим микроконтроллером;

– CMOS / TTL-совместимые входы / выходы.

Компания Nordic VLSIASA одной из первой применила технологию 18 мкм для построения однокристальных трансиверов в диапазоне СВЧ. Они единственные, кто разместил помимо трансивера еще и микроконтроллер 8051 и АЦП на том же кристалле. Простота конфигурации (всего по трем проводам), минимум внешних элементов, широкий диапазон питающих напряжений, индустриальный диапазон температур, низкое потребление и низкая цена делают компоненты Nordic идеальными для решения многих задач, где необходима беспроводная передача данных.

Семейство микросхем nRF9x5, выпускаемых фирмой, представляет собой универсальные однокристальные приемопередатчики, работающие на частотах 433, 868, 915 МГц. Частота функционирования для данной группы продуктов частота функционирования задается внешними пассивными компонентами.

В данных устройствах используется GFSK модуляция и манчестерский код для передачи и кодирования данных.

Максимальная скорость передачи данных составляет до 100 Кбит/с. Ширина полосы пропускания радиоканала составляет 100 кГц для частоты 433 МГц и 200 кГц для частот868 и 915 МГц. Благодаря наличию встроенной схемы управления напряжением питания данная ИМС функционирует в широком диапазоне напряжений: от 1.9 до 3.6 В. Использование запатентованной технологии Shock Burst TM позволяет повысить соотношение сигнал/шум и уменьшить нагрузку на внешний управляющий процессор. Суть данной технологии заключается в том, что вместе с основными данными передается автоматически сформированная приемопередатчиком CRC сумма, позволяющая при помощи циклического избыточного кода контролировать целостность принятой информации и формировать сигнал готовности для внешнего процессора. Также, благодаря технологии Shockk Burst TM в приемопередатчиках данной серии используется радиоканал с шириной полосы пропускания, значительно превышающей действительную скорость передачи данных,

благодаря чему обеспечивается высокая помехоустойчивость радиоканала. Управление приемопередатчиком осуществляется по SPI интерфейсу. Не требуются внешние ПАВ фильтры. Приемопередатчики серии nRF905 имеют два активных режима работы: Shock Burst TM RX и TX прием и передача данных соответственно, и два режима экономии энергии: Power Down и Standby Mode. В режиме Power Down радиочастотная часть и кварцевый генератор выключены и производится только обмен данными по SPI интерфейсу, в результате чего ток потребления снижается до 2 мкА. В режиме Standby Mode радиочастотная часть также выключена, но кварцевый генератор продолжает функционировать. При этом значительно ускоряется переход из экономичного режима в один из активных режимов. Также можно оптимизировать энергопотребление приемопередатчика благодаря возможности управления чувствительностью приемника и мощностью излучения передатчика.

Фирма Texas Instruments также известна своими решениями в области радиосвязи. Среди изделий фирмы, наиболее подходящих для организации радиообмена в РСПИ можно выделить радиотрансивер CC1120RHBR, предназначенный для работы в диапазонах 164 МГц – 190 МГц, 410 МГц – 475 МГц, 820 МГц – 950 МГц.

CC1120 и CC1121 – представители нового «Performance Line» семейства беспроводных трансиверов диапазона до 1ГГц с уникальными характеристикам. Новинка позволяет получить дальность передачи данных на открытом пространстве более 10км.

Основные отличительные особенности микросхемы:

– использование только цифровых фильтров;

– чувствительность приемника до –123дБм (CC1120);

– размер буферов TX и RX FIFO с 64 (CC1101) – 128 байт;

– минимальное частотное разделение каналов 12,5кГц (CC1120);

– режим просыпания по радиосигналу «Sniff Mode», позволяющий снизить энергопотребление, просыпание всего по 4 битам преамбулы;

– аппаратная пакетная обработка данных, CRC16, аппаратное кодирование (увеличивает чувствительность на 3-6дБ);

– поддержка работы с термокомпенсированным генератором (TCXO) – автоматическое отключение TCXO в режиме «power down».

Трансивер обеспечивает следующие методы модуляции несущей: 2-FSK, 2-GFSK, 4-FSK, 4-GFSK, ASK, MSK, OOK-их с максимальной скоростью передачи 200 кбит/с.

8 Заключение. Критерии оценки и выбор оптимального метода модуляции

В сущности любого вида модуляции лежит зависимость между скоростью передачи информации, ширина полосы канала и соотношения сигнал/шум. Данные параметры между собой связывает фундаментальная формула Шеннона

$$V_{ПЕР} = \Delta F \times \log_2\left(1 + \frac{P_c}{P_ш}\right)$$

где:

$V_{пер}$ – максимальная скорость передачи информации;

ΔF – ширина полосы канала передачи информации;

$P_с$ – средняя мощность сигнала;

$P_ш$ – мощность шума.

Из этой формулы следует, что с ростом скорости передачи информации необходимо увеличивать ширина полосы канала передачи информации (что мы наблюдаем при анализе любого вида модуляции).

Параметры по скорости передачи информации, ширине полосы канала, и значения соотношения сигнал/шум (в общем случае – дальность действия РСПИ) можно взаимно обменивать друг на друга.

Таким образом, разумно обменивать скорость передачи информации на соотношения сигнал/шум. Обычно ширина полосы канала фиксированная и средняя мощность сигнала (а значит и соотношение сигнал/шум) регламентируется соответствующими нормами связи и не может изменяться разработчиком РСПИ.

Исходя из вышесказанного, рациональным решением при построении протокола в РСПИ является разбиение зоны действия РСПИ на несколько зон. Передача информации в ближней зоне действия должна осуществляться с максимальной скоростью, в средней зоне скорость необходимо снизить в 2 раза, в дальней зоне – в 4 раза. Разумеется, низкочастотные фильтры в детекторе приемника должны быть согласованы со скоростью передачи информации от каждой зоны РСПИ.

Необходимо отметить, что формула Шеннона не учитывает вопросы физической реализации вида модуляции (амплитудная, частотная и т.д.) и возможность использования помехозащищенного кодирования. Поэтому использования треллис–модуляции (сочетания QAM с помехозащищенном кодированием) обеспечит наилучшую помехозащищенность в РСПИ.

При использовании помехозащищенного кодирования рационально выбрать относительную скоростью кода (R) в диапазоне от (7/8 – 1/3).

Примечание. При использовании модуляции методом прямой последовательности для расширения спектра – DSSS относительная скорость кода может быть и значительно больше приведенного выше значения.

Взаимосвязанным параметром со значением сигнал/шум является параметр BER.

Например, для передачи речи принимается уровень BER $\leq 10^{-3}$. В РСПИ принят уровень BER порядка $\leq (10^{-5} - 10^{-6})$.

В реальных РСПИ полоса частот, занимаемая радиосигналом всегда имеет ограниченное значение. Это необходимо делать хотя бы для исключения интерференции с иными системами связи. Имеются нормативные акты, регулирующие распределение частотного ресурса, при частотном разделении пользователей необходимо обеспечить отсутствие интерференции между ними, ограничены возможности полосы аппаратуры и др.

Исключение составляют сверхширокополосные системы связи (UWB). Хотя и для них полоса ограничена значением несколько ГГц. На данном этапе развития систем UWB передача в них осуществляется короткими (менее 1нс) импульсами гауссовой формы, а модуляция – изменением положения импульса во времени. Вопрос выбора оптимального метода модуляции в рассматриваемом здесь ключе для систем UWB не ставится.

Таким образом, задачу выбора оптимального метода модуляции при проектировании систем передачи информации по радиоканалу можно сформулировать следующим образом: для заданной ширины полосы сигнала ΔF, заданного максимального значения вероятности ошибки на бит BER–max необходимо определить оптимальный (обеспечивающий максимальную скорость приёма -передачи) вид модуляции (и число позиций модуляции) и максимальную скорость передачи данных в зависимости от отношения сигнала к спектральной плотности шума.

На рисунке 19 приведён пример выбора оптимального метода модуляции для следующих начальных данных радиосистемы:

– значение вероятности ошибки BER $\leq 10^{-4}$;

– полоса сигнала 10 МГц;

– протокол передачи данных без кодирования;

– фильтр «корень из приподнятого косинуса».

Реализация данного метода выбора оптимального алгоритма модуляции довольно сложна, так как прямое измерение соотношения мощности сигнала к спектральной плотности шума приемником – трудоемкая задача. Она требует измерения уровня сигнала с большим динамическим диапазоном и уровня шума, калибровки. Гораздо проще на

приемном конце измерить BER, передавая известную приемнику последовательность. Если известен BER, то для текущего вида модуляции легко получить величину Eb / N0 используя вычисленные заранее с помощью компьютерного статистического моделирования зависимости BER от Eb/N0, записанные в память приемника (наиболее известные из программ моделирования – AWR Design Environmen, Microwave Office и д.р.). Вообще же выбор оптимального вида модуляции всегда является компромиссом исходя из различных факторов и технических возможностей. Поэтому перед разработчиком всегда должен стоять вопрос о приоритетных задачах стоящих, перед вновь разрабатываемой РСПИ. Иногда определяющим таким фактором может быть время и стоимость разработки РСПИ. Тогда оправданным может быть использование FSK-модуляции (особенно если при этом скорость передачи информации не превышает 1200 – 2400 бод и РСПИ имеет среднюю емкость по количеству охраняемых объектов).

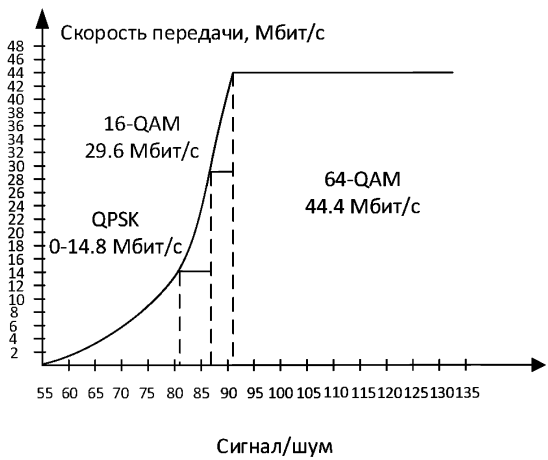

Рис. 19 Пример выбора оптимального метода модуляции

Применение QPSK – модуляции оправдано при необходимости получить максимальную дальность действия при умеренных затратах на разработку РСПИ.

Комбинированные методы модуляции оправдано использовать при наличии нескольких критических факторов (например: большая емкость РСПИ и значительная дальность действия РСПИ).

Новые методы организации связи, в первую очередь DSSS, FHSS и OFDM, целесообразно использовать при необходимости иметь значительную емкость системы или необходимости передавать большие объемы информации. Весомым аргументом при использовании этих видов связи является требование устойчивости к преднамеренному подавлению и скрытности передаваемой информации.

Многоуровневые виды модуляции позволяют повысить скорость передачи информации при заданных параметрах канала передачи, однако уровень помехозащищенности РСПИ при этом снижается пропорционально значению количеству позиций модуляции. Это наглядно продемонстрируют диаграммы сигнальных созвездий на рис.5. Чем ближе в пространстве находятся точки сигнального созвездия между собой, тем ниже помехоустойчивость метода модуляции.

Комбинированные методы модуляции позволяют максимально далеко разнести точки сигнального созвездия, чем и объясняется их лучшая помехозащищенность. При ограничении по занимаемой полосе частот в канале и использовании стандартных видов модуляции типа FSK стоит обратить внимание на такие виды модуляции как GFSK и GMSK, однако из-за малого индекса модуляции (m) данные виды модуляции проигрывают по помехоустойчивости.

Если рассматривать данные виды модуляции по критерию стоимости, то следует отметить, что наиболее дешевыми по реализации являются амплитудные виды модуляции, затем следует частотные виды модуляции. Фазовые и комбинированные виды модуляции близки между собой по стоимостным показателям.

По критерию цена/качество между частотными и амплитудными видами модуляции преимущество находится за частотными видами модуляции. Незначительный рост стоимости реализации частотных видов модуляции дает существенный выигрыш по качеству связи по сравнению с амплитудными видами модуляции.

По критерию цена/качество между фазовыми и комбинированными видами модуляции преимущество находится за комбинированными видами модуляции типа QAM.

Реализация различных видов модуляции в РСПИ возможно, как на базе отечественной элементной базы, так и с использованием иностранных комплектующих. Следует отметить, что номенклатура иностранных комплектующих значительно превышает отечественную.

9 Список использованной литературы

1) Гоноровский И.С. «Радиотехнические цепи и сигналы» том1, том2. «Советское радио». 1967 г.

2) Григорьев Н.Н. Учебно-справочное пособие «Особенности распространения радиоволн и антенно-фидерные устройства радиосистем» М.: НИЦ «Охрана».

3) Учебное пособие «Отечественные радиосистемы передачи тревожных извещений» – М.: НИЦ «Охрана», 2004 – 172 с.

4) ГОСТ Р 5057-94 «Устройства радиопередающие всех категорий и назначений народохозяйственного применения.

5) Мобильная связь, теория, практика, проблемы, возможности. (АО «Сага»).

6) «Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения», Валерий Ипатов, из-во «Техносфера».

7) «Системы связи с шумоподобными сигналами», Варакин Л.Е., из-во «Радио и связь», 1985 г.

9061-2017