

第 3 章

移动通信的关键技术

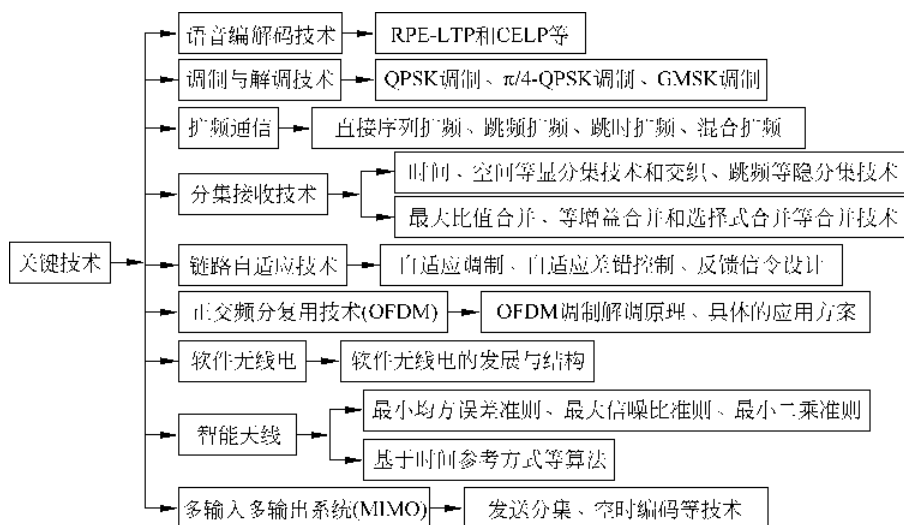
学习目标

- 理解并掌握 GSM 系统和 CDMA 系统中的语音编码、调制解调、扩频通信、分集技术这些关键基础技术,并能用自己的语言陈述其工作过程。
- 了解链路自适应技术,掌握链路自适应技术的基本概念,包括自适应调制、自适应差错控制、反馈信令设计等。
- 理解正交频分复用技术(OFDM)的基本原理,了解其与多输入多输出系统(MIMO)相结合的应用。
- 了解软件无线电的发展历程,理解软件无线电的基本原理,包括宽带/多频段天线与宽带射频模块、模/数转换部分、高速并行 DSP 技术等各个部分模块的作用及功能。
- 理解智能天线的基本原理与应用,包括智能天线的接受准则和自适应算法。
- 掌握多输入多输出系统的基本原理、核心技术与应用。

学习指导

在移动通信发展的这二十多年里,从传统的单基站大功率到蜂窝移动系统,从本地覆盖到区域、全国覆盖,并实现了国内与国际的漫游,从提供话音业务到提供包括低速数据的综合业务,从模拟移动通信系统到数字移动通信系统等,移动通信技术获得了很大的进步。因此本章主要介绍现代移动通信系统中正在不断发展的一些关键技术,如语音编码技术、调制解调技术、多址技术、分集技术、扩频通信链路自适应技术、OFDM 技术、软件无线电、智能天线、MIMO 系统等。本章涉及的基本概念很多,大家要仔细领会它们的含义,而且这些关键技术是学习后续内容的基础。为了帮助读者掌握所学内容,建议在学习本章时充分利用本章知识地图。

知识地图



课程学习

3.1 语音编、解码技术

数字移动网可提供高于模拟移动网的系统容量,这需要高质量、低速率的语音编码技术与高效率数字调制技术相结合。目前,降低语音编码速率和提高语音质量是国际上语音编码技术的两个主要研究方向。这是因为,语音编码速率与传输信号带宽成比例关系,即语音编码速率减半,传输信号所占用带宽也减半,而系统容量增加一倍,频率利用率可有效提高。同时,为了抑制误码对语音质量的影响,要研究抗误码能力强的编码方式,即采取高效纠错/检测编码的方案。

语音编码技术是将语音波形通过采样、量化,然后利用二进制码表示出来,即是将模拟信号转变为数字信号,然后在信道中传输;语音解码技术是上述过程的逆过程。语音编、解码技术要尽可能地使语音信号的原始波形在接收方无失真地恢复,主要分为波形编码、参数编码和混合编码这三大类。

1. 波形编码

该技术基于时域模拟语音的波形,按一定的速率采样、量化,对每个量化点用代码表示。解码是相反过程,将接收的数字信号序列经解码和滤波后恢复成模拟信号。波形编码能提供很好的语音质量,但编码速率较高,一般应用在对信号带宽要求不高的通信中。常见的波形编码技术包括有脉冲编码调制(PCM)、增量调制(DM)、差分脉冲编码调制(DPCM)、自适应差分脉冲编码调制(ADPCM)、自适应增量调制(ADM)、自适应传输编码(ATC)等。

2. 参数编码

参数编码又称声源编码,该技术基于发音模型,从模拟语音中提取各个特征参量并进行量化编码,可实现低速率语音编码,但话音质量只能达到中等。常见的参数编码技术包括线性预测(LPC)声码器和余弦声码器等。20世纪80年代中期人们又对LPC声码器进行了改进,提出了混合激励、规则激励等。

3. 混合编码

混合编码是将波形编码和参数编码结合起来,吸收有波形编码的高质量和参数编码的低速率这两者的优点。常见的混合编码技术有基于线性预测技术的分析-合成编码算法,如泛欧GSM系统的规则脉冲激励-长期预测编码(RPE-LTP)混合编码方案等。

3.1.1 GSM 语音编、解码技术简介

LPC技术是将线性预测技术应用于语音编码领域,形成了较有效的语音分析技术。利用LPC技术能有效地降低声码器的编码速率,但质量不尽如人意。对此可采用声激励声码器来构成更精确的激励模型,这样系统就包括两条不同的传输路径:一条路径产生并传送线性预测参数(线性滤波器数目和增益等);另一路径是滤出波形信号的低频部分,并传送波形编码。在接收端的话音合成器中,将收到的低频话音信号经过适当组合及平滑处理后,作为激励信号输入到数字滤波器中以恢复话音,而数字滤波器由接收到的预测参数确定。这种改进的线性预测编码,同时对语音信号的特征参数和原信号的部分波形进行了编码,所以称为混合编码。

GSM数字移动通信系统采用13kb/s的规则脉冲激励-长期预测编码语音编码技术,它包括预处理、LPC分析、短时分析滤波、长时预测和规则码激励编码等5个主要部分,如图3-1所示。为使合成波形更接近于原信号,该方案采用间隔相等、相位和幅度优化的规则脉冲作为激励源,并结合长期预测,从而消除信号冗余度,降低了编码速率,且易于实现。

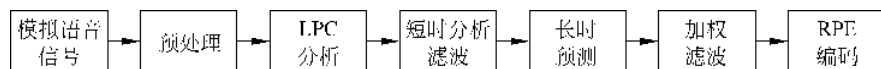


图 3-1 RPE-LTP 编码示意图

(1) 预处理

主要完成两项工作,即离散语音信号和高频预加重。

① 先用8kHz采样频率对输入的模拟语音信号进行采样得到离散语音信号 $S_0(n)$,滤除 $S_0(n)$ 中的直流分量,得到 $S_{0f}(n)$ 。

② 再采用一阶有限冲激响应(FIR)滤波器进行高频预加重,得到信号 $S(n)$;加重的目的是加强语音谱中的高频共振峰,从而提高谱参数估值的精确性。

(2) LPC 分析

产生供短时分析滤波时使用的参数,然后按20ms一帧进行处理,共取160个话音样本,编码为260bit的编码块,每帧计算出8个LPC反射系数 $r(i)$,再转换成对数面积比参数

LAR(i),最后对 LAR 进行量化得到 LAR_c 。一方面送到解码器,另一方面对它解码,恢复出量化后的反射系数 $r'(i)$,以供短时分析滤波时使用。

(3) 短时分析滤波

短时分析滤波主要用于滤除语音信号样点之间的短时相关性,它让信号 $S(n)$ 经过格型滤波器,产生短时 LP 余量信号 $d(n)$ 。

(4) 长时预测

长时预测是为了除去语音信号相邻基音周期之间的长时相关性,以便压缩编码速率。长时预测按子帧处理,每一帧分成 4 个子帧。长时预测使用过去子帧中经过处理后恢复出来的短时余量信号 $d'(n)$,对当前子帧的余量信号 $d(n)$ 进行预测。通过对 $d(n)$ 和 $d'(n)$ 进行互相关运算,获得各个子帧的长时预测系数 b 和最佳延时 N ,分别用 2bit 和 7bit 编码,即 b_c 和 N_c ,把它们作为边信息送到解码器。将各个子帧的长时余量信号 $e(n)=d(n)-d'(n)$ 送往 RPE 编码器的前端加权感觉滤波器。

(5) 规则码激励序列编码

经短时、长时分析之后得到的 LP 余量信号,在这里进行平滑及降维激励脉冲串的选取。

(6) 比特分配

GSM 编码方案的语音帧长 20ms,每帧有 260bit,所以总的编码速率为 13kb/s。经过激励信号自身编码,把以上一组参数组合到 260bit 的帧中,编码后 260bit 分配如表 3-1 所示。260bit 再经过信道编码、交织、调制、上变频,得到射频信号形成 GSM 突发发射到无线信道中。

表 3-1 编码后 260bit 分配

LPC 滤波	8 参数	每 5ms 中比特数	每 20ms 中比特数
LPT 滤波	N_r (延时参数)	7	28
	b_r (采样相位)	2	8
激励信号(语音)	子采样相位	2	8
	最大幅度	6	24
	13 个采样	39	156
RPE-LPT 总计			260

GSM 语音信源解码技术是上述编码技术的逆过程,但也略有不同,它在信道解码后获得的语音信息中进行 RPE 解码、长时预测分析滤波、短时分析滤波和后处理,来实现语音解码,最后还要将获得的离散信号去加重滤波,送 D/A 转换电路后即可得到语音信号。具体过程这里就不再赘述了。

3.1.2 CDMA 中的语音编、解码技术简介

CDMA 的语音编码主要采用码激励线性预测编码(CELP),它包含多种算法,如美国联邦通信标准的 CELP 算法(4.8kb/s)、IS-54 的 VSELP 算法(8kb/s)、IS-95 的 QCELP 等,下面主要简介 IS-95 所使用的 QCELP 算法。

1. CELP(Code Excited Linear Prediction,码激励线性预测)编码概述

CELP 语音编码算法综合使用了线性预测、矢量量化、感觉加权、A-B-S(综合分析法)等

技术,具有很清晰的语音品质和很高的背景噪声免疫性。CELP 编码器的基本原理框图如图 3-2 所示,其核心是用线性预测提取声道参数,用一个包含许多典型激励矢量的码本作为激励参数,每次编码时都在这个码本中搜索一个最佳的激励矢量,这个激励矢量的编码值就是这个序列的码本序号。具体原理如下:目前常用的 CELP 模型中,激励信号来自两个方面,长时基音预测器(又称自适应码本)和随机码本。自适应码本被用来描述语音信号的周期性(基音信息)。固定的随机码本则被用来逼近语音信号经过短时和长时预测后的线性预测余量信号。从自适应码本和随机码本中搜索出的最佳激励矢量乘以各自的最佳增益后相加,便可得到激励 $i(n)$ 。它一方面被用来更新自适应码本,另一方面则被输入到合成滤波器 $H(z)$ 以得到合成语音 $\hat{s}(n)$ 。 $\hat{s}(n)$ 与原始语音 $s(n)$ 的误差通过感觉加权滤波器 $W(z)$ 后可得到感觉加权误差信号 $e(n)$ 。使 $e(n)$ 均方误差为最小的激励矢量就是最佳激励矢量。

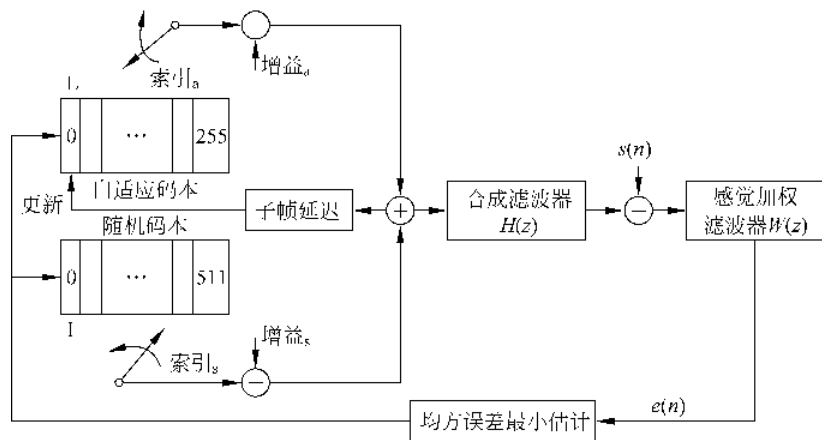


图 3-2 CELP 编码原理框图

CELP 的解码过程已经包含在编码过程中。在解码时,根据编码传输过来的信息从自适应码本和随机码本中找出最佳码矢量,分别乘以各自的最佳增益并相加,可以得到激励信号 $i(n)$,将 $i(n)$ 输入到合成滤波器 $H(z)$,便可得到合成语音 $s(n)$,如图 3-3 所示。可以看出,搜索最佳激励矢量是通过综合出重建语音信号进行的。这种通过综合来分析语音编码参数的优化方法称为综合分析法,即 A-B-S 方法。这种采用闭环 LPC 结构,由特征参数激励得到预测信号,将此信号与原信号 $s(n)$ 相减得到残差信号 $\Delta e(n)$,把此信号与有关参数一并编码传送,在解码端进行误差修正可有效改善合成语音质量,但也使编码运算量增加不少。为了进一步降低编码速率,可以对一定时间内残差信号可能出现的各种样值的组合按一定规则排列构成一个码本,编码时从本地码本中搜索出一组最接近的残差信号,然后对该组残差信号对应的地址编码并传送,解码端也设置一个同样的码本,按照接收到的地址取出相应的残差信号加到滤波器上完成语音重建,则显然可以大大减少传输比特数,提高编码效率。这就是 CELP 编码的基本原理。固定码本采用不同的结构形式,就构成不同类型的 CELP,如采用代数码本、多脉冲码本、矢量和码本的 CELP 分别称为 ACELP、MP-CELP 和 VSELP 编码。

对 CELP 算法来说码本是关键。如果码本编得好,就可以在低码率的情况下获得较好的语音质量。CELP 码激励线性预测编码的主要特点是利用了人类听觉的掩蔽性等特性,采用了对误差信号进行感觉加权、用分数延迟改进基音预测、用修正的 MSPE 准则来寻找

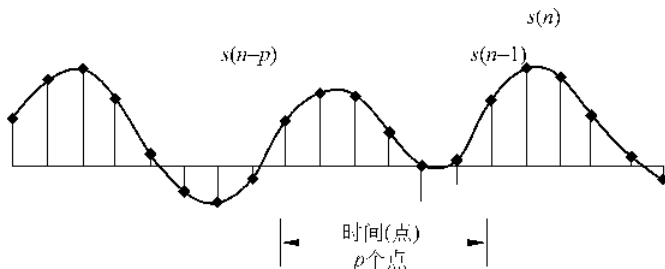


图 3-3 CELP 语音合成示意图

“最佳”的延迟、基于信道错误率估计的自适应平滑器等多项技术,从而大大改善了语音的质量,尤其改善了女性语音的质量,在信道误码率较高的情况下也能合成自然度较高的语音。

2. QCELP 受激线性预测编码

QCELP 是美国 Qualcomm 通信公司的专利语音编码算法,是北美第二代数字移动电话(CDMA)的语音编码标准(IS-95)。这种算法不仅可工作于 4/4.8/8/9.6kb/s 等固定速率上,而且可变速率地工作于 800~9600b/s 之间。QCELP 算法被认为是到目前为止效率最高的一种算法。该算法可依靠适当的门限值来决定所需速率,而门限值根据背景噪声电平的变化而变化,这样就抑制了背景噪声,使得即使在喧闹的环境中,也能得到良好的话音质量,其语音质量可以与有线电话媲美。

QCELP 的编码原理如图 3-4 所示,采用了 3 种滤波器:动态音调合成滤波器、线性预测编码滤波器和自适应滤波器,从而使得话音的自然度更好。QCELP 采用动态可变速率,大大降低了码的平均速率。

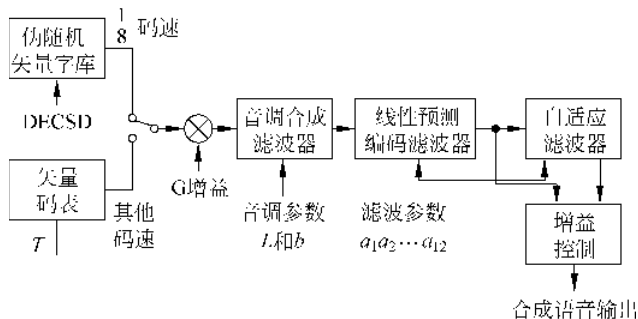


图 3-4 QCELP 方案框图

QCELP 方案的实现如下:

- (1) 对模拟话音按 8kHz 采样。
- (2) 按 20ms 划分一个话音帧,每帧有 160 个样本点。
- (3) 将 160 个样本点生成 3 个参数子帧并不断更新后按一定帧结构送至接收端:滤波参数 $a_1, a_2, \dots, a_{12}$ 对任何速率每 20ms 更新一次,音调参数和码表参数是不同速率,更新次数不一样。

表 3-2 QCELP 的参数

参 数	速率 1(9.6kb/s)	速率 2(4.8kb/s)	速率 3(2.4kb/s)	速率 4(1.2kb/s)
每帧更新 LPC 子帧次数	1	1	1	1
每次 LPC 子帧更新所需取样值	160(20ms)	160(20ms)	160(20ms)	160(20ms)
每个子帧所占比特	40	20	10	10
每帧更新的音调合成子帧次数	4	2	1	0
每次音调合成子帧更新所需取样值				—
每个音调合成子帧所占比特数	10	10	10	—
每帧更新的码表子帧次数	8	4	2	1
每次码表子帧更新所需取样值	20(2.5ms)	40(5ms)	80(10ms)	160(20ms)
每个码表子帧所占比特数	10	10	10	6 *

- ① 若 $R(0)$ 大于 3 个门限值, 则选择速率“1”。
- ② 若 $R(0)$ 大于 2 个门限值, 则选择速率“1/2”。
- ③ 若 $R(0)$ 大于 1 个门限值, 则选择速率“1/4”。
- ④ 若 $R(0)$ 小于所有门限值, 则选择速率“1/8”。
- ⑤ 每次只允许变化一次, 半速率时门限“1”为实际门限的“1/2”。

思考与练习

(2) GSM 数字移动通信系统采用的语音编码技术包括_____、_____、_____、
和_____等 5 个主要部分。

(3) GMSK 的解调可采用类似于 MSK 方式的正交相干解调技术,不能使用非相干检测解调技术,如差分解调和鉴频器解调等。()

A. PCM B. LPC C. ADM
D. ATC E. RPE-LTP

4. 试用自己的语言简述 QCELP 编码的基本原理。

3.2 调制与解调技术

调制解调技术的宗旨是为了使通信系统的抗干扰、抗衰落性能得到提高并使频率资源得到更充分的利用。一般在通信系统的发射机端进行调制,调制后的信号称为已调信号。在接收机端要将已调信号还原成要传输的原始信号,即解调制或解调。通过调制解调可以实现以下的主要功能:

(1) 便于传输:将所需传送的基带信号进行频谱搬移至相应频段的信道上以便于传输。

(2) 抗干扰:调制后具有较小的功率谱占用率(即功率的有效性),从而提升抗干扰能力。

(3) 提高系统有效性:单位频带内传送尽可能高的信息率($\text{b/s} \cdot \text{Hz}^{-1}$),即提高频谱有效性。

按照调制器输入信号的形式,调制可分为模拟调制和数字调制,而数字调制又可分为线性调制技术和恒包络调制技术。目前的移动通信系统都是采用数字调制技术,包括有缓变调频(TFM)、相干移相键控(CPSK)、四相移相键控(QPSK)、高斯最小移频键控(GMSK)等,数字调制技术具有抗干扰能力强、易于加密、话音间隙噪声小等优点。

调制技术的选择对数字蜂窝移动系统的容量有直接的影响,它通过每赫兹每秒比特数($\text{b/s} \cdot \text{Hz}^{-1}$)决定着单物理信道的带宽效率。下面介绍几种应用于移动和个人通信系统的调制方案。

3.2.1 四相移相键控(QPSK)调制

QPSK 技术应用广泛,是一种正交相移键控。图 3-5 所示为传统 QPSK 调制器框图,其基本工作原理如下:

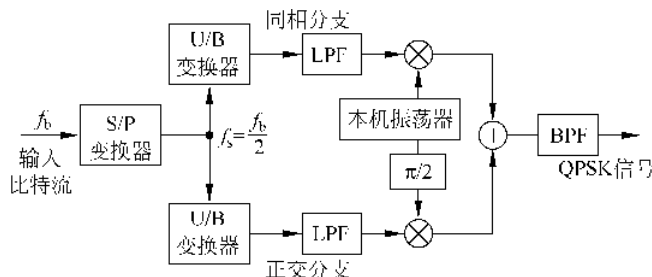


图 3-5 QPSK 调制器

比特率为 f_b 的输入单级二进制码流通过串/并(S/P)变换器转换成比特率为 $f_s = f_b/2$ 的两个比特流(同相和正交码流)。单双(U/B)变换器把两个比特流变换成两个双极二进制信号,之后通过频谱成形滤波器,再被同相和正交载波调制。其中调制使用了双边带载波抑制幅度调制(DSS-SC-AM)技术。两个已调信号合成产生一个 QPSK 信号。QPSK 信号在

调制器输出端滤波以进一步限制其功率谱,阻止其溢出至邻信道,也可滤除调制过程中的带外寄生信号,图 3-6 所示为相干 QPSK 解调器框图。输入带通滤波器滤除带外噪声和邻道干扰,滤波器输出端信号分成两部分,分别用同相和正交载波相干解调,之后两路信号通过低通滤波、1 比特模拟/数字(A/D)转换器再生出同相和正交基带信号。这两个信号流通过一个并/串(P/S)变换器再组合形成最初的比特流。图 3-6 中载波恢复环路提供与接收未调信号同步的同相正交载波。

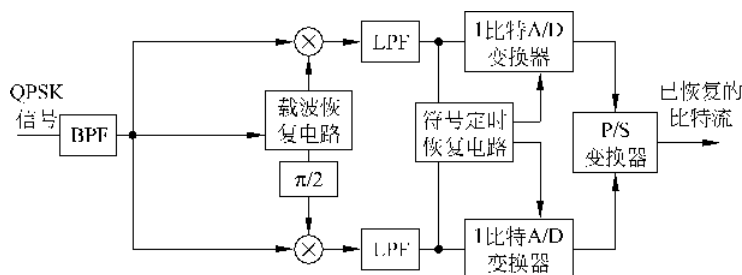


图 3-6 相干 QPSK 解调器

大多数实际的载波恢复电路在恢复载波过程中将产生一个相位模糊度。QPSK 系统很可能出现四相位模糊,产生严重的误比特率。为清除相位模糊,可在调制器中使用差分编码器,在解调器中使用差分解码器。图 3-7 给出了差分 QPSK 解调器框图。

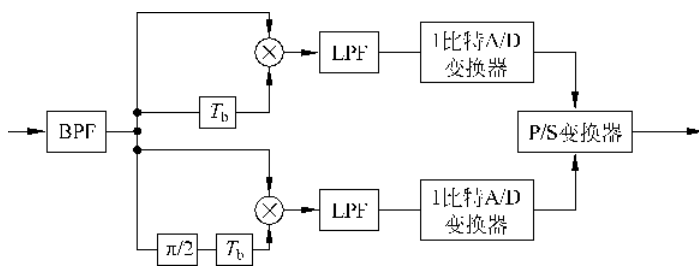


图 3-7 QPSK 差分解调器框图

一个未滤波 QPSK 信号的功率谱密度为

$$S(f) = 4CT_b \left[\frac{\sin 2\pi(f - f_c)T_b}{2\pi(f - f_c)T_b} \right]^2 \quad (3-1)$$

式中 C 为通过 1Ω 电阻的归一化平均信号功率, $T_b = 1/f_b$ 为比特持续时间。假定调制器中使用了具有升余弦函数均方根特性、滚降系数为 α (最佳特性时) 的频谱成形滤波器,则很容易得到 QPSK 信号滤波后的频谱,如图 3-8 所示。图 3-8(a) 中曲线是未滤波 QPSK 频谱,曲线(b)是带幅度均衡器的滚降系数为 α 的升余弦函数的幅度响应,曲线(c)是已滤波 QPSK 频谱只存在加性高斯白噪声(AWGN),且无符号间干扰(ISI)时的幅度响应

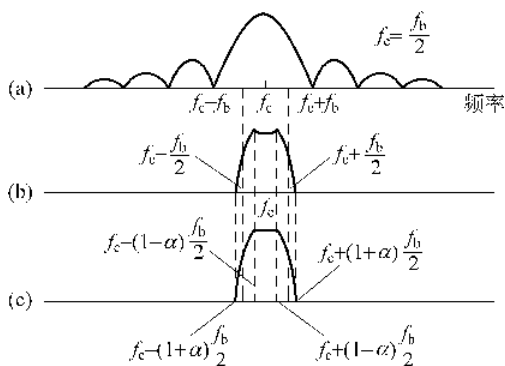


图 3-8 QPSK 信号的功率谱密度

应。由图 3-8 可知 QPSK 信号带宽为 $(1+\alpha)f_s$, 故谱效率为

$$\eta_{\text{QPSK}} = \frac{f_b}{B} = \frac{f_b}{(1+\alpha)f_s} = \frac{2}{1+\alpha} \quad (3-2)$$

可见, 最小带宽情况, 即 $\alpha=0$ 时, QPSK 系统的理论谱效率为 $2\text{b/s} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。目前的技术可使实际滤波器的滚降系数降到 $\alpha=0.2$, 则谱效率实际可达 $17\text{b/s} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 左右。

3.2.2 $\pi/4$ 移位 QPSK ($\pi/4$ -QPSK) 调制

$\pi/4$ 移位 QPSK 技术是在 QPSK 基础上通过载波相位移动 $\pm\pi/4$ 和 $\pm3\pi/4$ 得到的。该调制方案的主要优点是它可使用非相干检测(差分检测或 FM 鉴频器), 用低复杂性的接收机就可完成。而且, 当存在多径衰落时, 它的工作性能优。 $\pi/4$ 移位 QPSK 的另一个优点是同 QPSK 相比, 包络起伏比较小(它的最大相变为 135°), 故有较好的输出谱特性。日本和美国的第二代蜂窝数字移动无线系统都选用了该调制方案。

$\pi/4$ 移位 QPSK 的信号元素可看成是从两个彼此相移 $\pi/4$ 的信号星座图中交替选样出来的。 $\pi/4$ 移位 QPSK 调制器框图示于图 3-9 中。输入比特流经串/并变换器转换成两个并行流 (a_k, b_k) , 并行流的符号率为输入比特流的一半。信号映射电路输出端的第 k 个同相和正交脉冲由它的前一个脉冲电平 I_{k-1} 、 Q_{k-1} 及输入符号 a_k 、 b_k 决定。

$$I_k = I_{k-1} \cos\theta_k - Q_{k-1} \sin\theta_k \quad (3-3)$$

$$Q_k = I_{k-1} \sin\theta_k + Q_{k-1} \cos\theta_k \quad (3-4)$$

而 a_k 、 b_k 反过来与已调信号的相位变化有关, 如表 3-3 所列, 该调制器的其他部分同 QPSK 调制器。

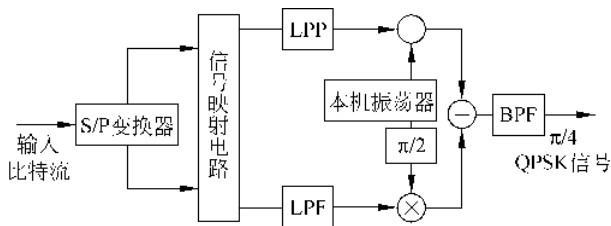


图 3-9 $\pi/4$ 移位 QPSK 和 $\pi/4$ QPSK 调制器

表 3-3 $\pi/4$ QPSK 系统相移与信息比特关系

信息比特 $a_k b_k$	0 0	0 1	1 1	1 0
相移 θ_k	$\pi/4$	$3\pi/4$	$5\pi/4$	$7\pi/4$

$\pi/4$ 移位 QPSK 的解调可用下面差分检测方法之一实现。

(1) 基带差分检测: 该方法的差分解码是在已恢复的同相和正交基带信号上进行的, 如图 3-10 所示。它须使用本机振荡器, 但不需相位相干检测。因为相位误差已在基带差分检测中去掉。

(2) 中频差分检测: 图 3-11 所示为 $\pi/4$ 移位 QPSK 中频差分检测器框图。差分解码是在接收的中频信号上完成的, 使用了一个延迟线和两个乘法器。该方案的优点是不需本机振荡器。为使符号间干扰和噪声影响减至最小, 其中 BPF 和 LPF 的带宽选为 $0.57/T$ 。

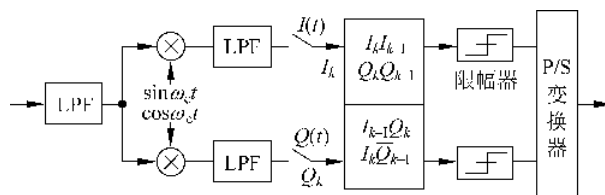


图 3-10 基带差分检测器

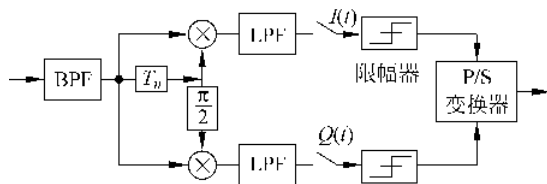


图 3-11 中频差分检测器

(3) 限幅 FM 鉴频器检测：如图 3-12 所示。FM 鉴频器提取接收信号的瞬时频偏。积分-泄放电路对每一符号持续期上的频偏积分，积分取两个抽样瞬相位差。最后，用 4-电平门限比较器检测输出相位差。

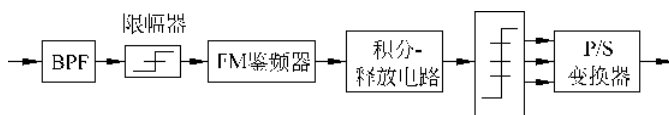


图 3-12 限幅 FM 鉴频检测器

若存在同波道干扰和高斯噪声时，可通过适当选取电路元器件，使以上 3 种方案的性能相同。

美国数字蜂窝移动通信系统 (IS-54) 采用的是滚降系数 $\alpha=0.35$ 的 $\pi/4$ 移位 QPSK 调制方案，该系统突发传输信号比特率为 48.6kb/s，信道带宽为 30kHz，谱效率为 $1.62\text{b/s} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。日本的系统采用的是滚降因子 $\alpha=0.5$ 的 $\pi/4$ 移位 QPSK 技术，其突发传输比特率和实际信道带宽分别为 42kb/s 和 25kHz，带宽效率为 $1.68\text{b/s} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。

3.2.3 高斯最小移频键控 (GMSK)

GMSK 是一种恒包络调制方案，其优点是能在保持谱效率的同时维持相应的同波道和邻波道干扰，且包络恒定，所以可用简单高效的 C 类放大器实现。

GMSK 的基本原理是基带信号先经过高斯滤波器成形，再进行最小移频键控调制 (MSK)。MSK 是二进制连续相位移频键控 (FSK) 的一个特例，而 GMSK 主要是改进了它的带外特性，使其衰减速度加快。MSK 调制器可用压控振荡器 (VCO) 或正交形式实现，如图 3-13 所示，解调器可用相干检测实现，也可用非相干检测实现，如一比特差分检测和二比特差分检测等。

GMSK 调制器的一个简单实现方法就是用带调制前加高斯成形 LPF，用 VCO 来实现，