

DMR 中 4FSK 调制解调技术的研究及性能分析

陈俊洁

北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 (100876)

E-mail: chenjj@bupt.cn

摘要: DMR协议是欧洲电信标准协会(ETSI)于2004年所提出的一种新型的数字集群通信协议, 具有很好的发展前途。本文的研究重点分析了数字对讲机系统的发展现状及前景, 并对DMR中物理层的4FSK调制解调部分用MATLAB进行了仿真实现。并将其通过高斯白噪声信道, 分析了该系统的性能。统计计算了该实现方案的误码率, 给出了程序产生的一些必要的图表。

关键词: DMR; 4FSK; 调制; 解调

1. 引言

人类最早使用的无线移动通信设备即为无线电对讲机。美国摩托罗拉公司于1936年研制出了第一台移动无线电通信产品——“巡警牌”调幅车用无线电接收机, 在1940年又为美国陆军通信兵研制出了第一台手持式双向无线电调幅对讲机。经过长期的发展, 现在对讲机的技术已经相当成熟, 应用也十分普遍, 已从专业化领域走向普通消费, 从军用扩展到民用^[1]。

无线电对讲机是移动通信中的一个重要分支。它是一种无线的可在移动中使用的一点对多点进行通信的终端设备, 可使许多人同时彼此交流, 使许多人能同时听到同一个人说话, 但是在同一时刻只能有一个人讲话。这种通信方式的特点为: 即时沟通、一呼百应、经济实用、运营成本低、设备体积小、使用方便, 组网简便、适应性强、不耗费通话费用, 同时还具有组呼通播、系统呼叫、机密呼叫等功能^[2]。其作用在处理紧急突发事件中, 在进行调度指挥中等是其它通信工具所不可比拟的。无线电对讲机和其它无线通信工具的市场定位各不相同, 难以互相取代, 还将长期使用下去。

在模拟对讲机通信中, 不需要传送任何形式的信令, 只要将各对讲机移动台调谐到同一频率, 都可以随时以“按下讲话”(PTT)的方式来通话, 并能随时接收到其他任何对讲机移动台发送的信息。如今, 模拟对讲机仍然占据绝大部分的市场, 但是由于数字通信可以提供更丰富的业务种类, 更好的业务质量、保密特性和连接性, 以及更高的频谱效率, 因此数字对讲机的研究、生产和使用是与时俱进的, 符合信息化、数字化发展的必然趋势。DMR(Digital Mobile Radio, 数字移动无线电)协议是欧洲电信标准协会(ETSI)于2004年所提出的一种新型的数字集群通信协议, 具有很好的发展前途。

相比于模拟对讲机, 数字对讲机有许多特点^[3]:

(1)、频谱利用率高。与蜂窝数字技术相似, 数字对讲机可以在一条指定的信道上装载更多用户, 提高了频谱的利用率, 解决了频率拥挤的问题, 具有长远的意义。

(2)提高了话音质量。和模拟对讲机相比, 数字通信技术拥有系统内错误校正的功能, 可以在更广泛的信号环境中, 更好地保证语音音频的质量, 其接收到的音频噪音更少, 话音质量更高。

(3)提高和改进语音和数据的集成, 改变了控制信号随通讯距离增加而降低的弱点。数字对讲机可以提供更好的数据处理及界面功能, 使更多的数据应用可以被集成到同一个双向无线通讯基站结构中, 对语音和数据服务集成更完善与方便。

这三大特点使数字对讲机成为未来对讲机技术发展的必然趋势。

本论文将重点研究数字对讲机DMR射频处理模块中调制解调的技术及分析其性能, 并

用软件加以实现。所依据的为ETSI规定的DMR标准中的有关4FSK调制解调的参数及方案^[4]。

2. DMR 系统介绍及软件实现方案设计

按照功能上的划分可将数字对讲机分为以下几个组成部分:语音信号的采集模块、语音信号处理模块、控制模块、无线传输模块以及语音信号输出模块^[5]。

语音处理电路主要负责对原始模拟语音信号的检测和采集,通常的设备是麦克风。
语音信号处理模块负责对模拟语音信号进行数字采样、编/译码、数据压缩、加/解密、滤波去噪等工作。
微处理器主要负责运算、数据的控制、软件流程的控制,主要由拥有中央处理器功能的微处理器来担任,通常可选用DSP或单片机来实现。
射频处理电路主要负责信号的调制/解调、发送/接收功能,主要由专用的无线信号射频芯片来完成^[5]。

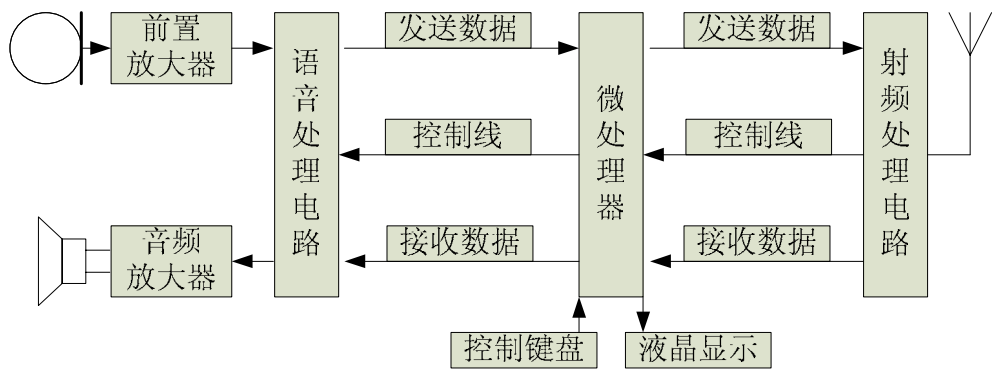


图 1 数字对讲机系统结构图^[5]

2.1 DMR 中物理层概述

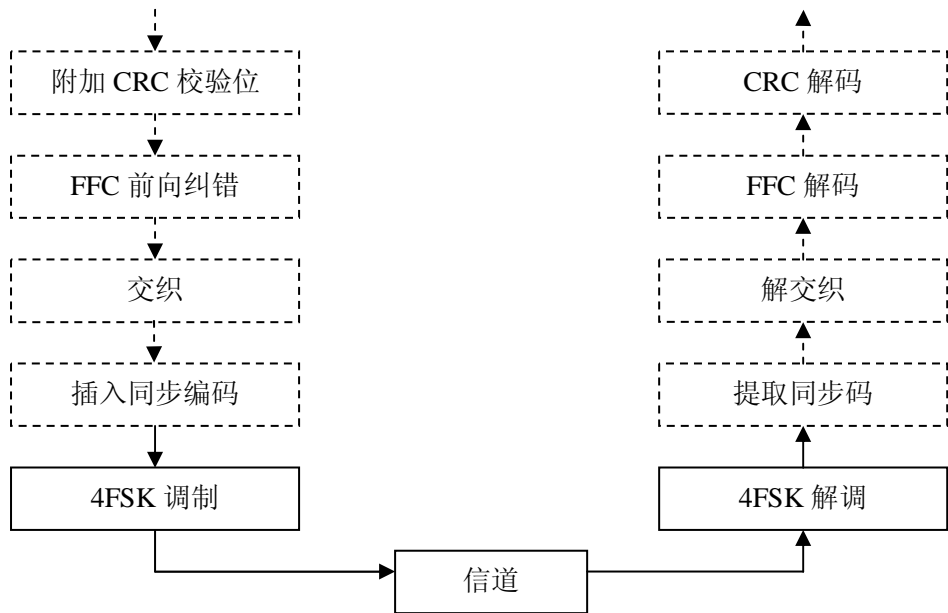


图 2 物理层(涉及部分链路层)^[4]

首先，对于上层传输过来的数据，先进行CRC校验和FEC前向纠错。对于不同类别的模块，有不同的编码方式，且不同的编码方式规定的交织(块内交织)方法不同。将交织后的

数据按排列顺序平均分成两部分，分别放在帧的两头，接着在中间插入同步或者其他嵌入式信令，这样就形成一个突发帧，再对这些形成的帧进行4FSK调制，就可以发射了。

4FSK信号进入模拟信道，经过衰落和时延，并加入噪声后，传送到接收端。接收端再进行4FSK解调，提取同步码，解交织，FEC解码以及CRC解码得到最终数据^[4]。

本文即研究图2所示的实线部分的4FSK调制解调的技术，用软件加以仿真实现。并对其通过高斯白噪声信道的性能进行分析。

2.2 4FSK 调制算法分析

(1)、将输入的二进制序列按奇位、偶位进行串并转换。

(2)、根据DMR标准中的符号和比特的对应关系表1^[4]，将二进制的0、1序列映射为相应的四电平符号流。

表 1 二进制符号对4FSK频偏的映射^[4]

信息比特		符号	4FSK频偏
Bit 1	Bit 0		
0	1	+3	+1.944KHz
0	0	+1	+0.648KHz
1	0	-1	-0.648KHz
1	1	-3	-1.944KHz

(3)、将这些符号流每符号插入8个数值点，并输入平方根升余弦滤波器进行平滑处理，则可得输入调制信号 $m(n)$ 。

滤波器为平方根升余弦滤波器^[4]，奈奎斯特升余弦滤波器的一部分用于抑制邻道干扰，另一部分用于接收机抑制噪声。抑制邻道干扰滤波器的输入包含一系列脉冲，这些脉冲之间的间隔为208, 33ms(1/4800s)。通过定义根升余弦滤波器的频率响应为奈奎斯特升余弦滤波器的平方根，来定义奈奎斯特升余弦滤波器的分割。滤波器的群延迟在带通范围 $|f|<2880\text{Hz}$ 内是平滑的。滤波器的幅频响应由下面公式近似给出^[4]：

$$\begin{aligned}
 |F(f)| &= 1 & \text{当 } |f| \leq 1920 \text{ Hz} \\
 |F(f)| &= |\cos(\pi f / 1920)| & \text{当 } 1920 \text{ Hz} < |f| \leq 2880 \text{ Hz} \\
 |F(f)| &= 0 & \text{当 } |f| > 2880 \text{ Hz}
 \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $|F(f)|$ 代表平方根升余弦滤波器的幅频响应。

则该滤波器的传输频率 df 为 $2880-1920=960\text{Hz}$,

滤波器的等效截止频率 F_0 为 2400Hz 。

(4)、将 $m(n)$ 输入频率调制器进行FM调制。则可得4FSK调制输出信号。



图 3 4FSK 调制器

$$\text{调频信号: } S_{FM}(t) = A_c \cos \left[\omega_c t + k_f \int_{-\infty}^t x(\tau) d\tau \right] \quad \text{式中: } k_f \text{ 为调频指数。}$$

将其离散化,在 nT_s 的时间内对信号 $m(n)$ 累加求和,得:

$$S(nT_s) = A \cos \left[\omega_c nT_s + KfT_s \sum_{k=-\infty}^n m(k) \right] \quad (2)$$

由(2)式得该4FSK系统调制实现方框图如下:

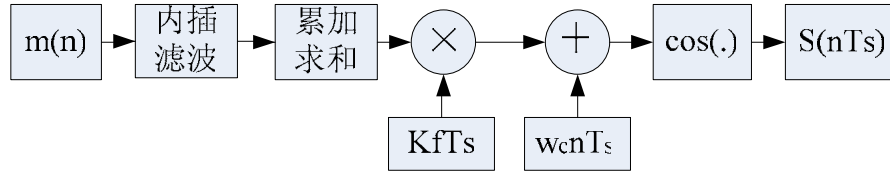


图 4 4FSK 调制方框图

2.3 4FSK 解调算法分析

解调过程跟调制过程恰好相反, 将经过信道传输到接收端的信号通过频率解调器进行解调。对于同一种数字调制信号, 采用相干解调方式的误码率低于采用非相干解调方式的误码率, 所以这里采用相干解调方式。将解调后的信号经滤波器后, 再经抽样判决则可输出四电平符号, 将其按表1反映射, 即可输出二进制比特。

解调框图如下所示:

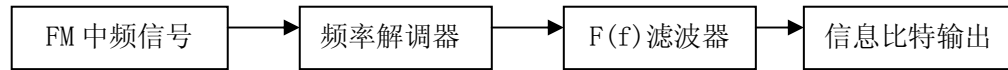


图 5 4FSK解调器

解调中F(f)滤波器的幅频响应与调制中相同。

将(2)式cos部分按三角公式展开得:

$$S(nT_s) = A \cos(\omega_c nT_s) * \cos \left[KfT_s \sum_{k=-\infty}^n m(k) \right] - A \sin(\omega_c nT_s) * \sin \left[KfT_s \sum_{k=-\infty}^n m(k) \right] \quad (3)$$

$$\text{设 } I(nT_s) = \cos \left[KfT_s \sum_{k=-\infty}^n m(k) \right] \quad (4)$$

$$\text{和 } Q(nT_s) = \sin \left[KfT_s \sum_{k=-\infty}^n m(k) \right] \quad (5)$$

$$\text{则: } S(nT_s) = A \cos(\omega_c nT_s) * I(nT_s) - A \sin(\omega_c nT_s) * Q(nT_s) \quad (6)$$

将 $S(nT_s)$ 分别乘上本地载波 $\cos(\omega_c nT_s)$ 和 $\sin(\omega_c nT_s)$ 得:

$$S(nT_s) * \cos(\omega_c nT_s) = A \cos(\omega_c nT_s) * \cos(\omega_c nT_s) * I(nT_s) - A \sin(\omega_c nT_s) * \cos(\omega_c nT_s) * Q(nT_s) \quad (7)$$

$$S(nT_s) * \cos(\omega_c nT_s) = 1/2A[1 + \cos(2\omega_c nT_s)] * I(nT_s) - 1/2A \sin(2\omega_c nT_s) * Q(nT_s) \quad (8)$$

$$S(nT_s) * \sin(\omega_c nT_s) = A \cos(\omega_c nT_s) * \sin(\omega_c nT_s) * I(nT_s) - A \sin(\omega_c nT_s) * \sin(\omega_c nT_s) * Q(nT_s) \quad (9)$$

$$S(nT_s) * \sin(\omega_c nT_s) = 1/2A * \sin(2\omega_c nT_s) * I(nT_s) - 1/2A * [1 - \cos(2\omega_c nT_s)] * Q(nT_s) \quad (10)$$

将其经过低通滤波器, 滤掉高频分量, 则(8)式剩下 $1/2A * I(nTs)$ 分量, (10)式只剩下 $1/2A * Q(nTs)$ 分量。

$$Q(nT_s) / I(nT_s) = \tan \left[KfT_s \sum_{k=-\infty}^n m(k) \right] \quad (11)$$

$$\Phi(nT_s) = \arctan [Q(nT_s) / I(nT_s)] = KfT_s \sum_{k=-\infty}^n m(k) \quad (12)$$

$$\text{因而 } d\Phi = \Phi[nT_s] - \Phi[(n-1)T_s] = KfT_s * m(n) \quad (13)$$

$$\text{则, } m(n) = d\Phi / (KfT_s) \quad (14)$$

将(13)式经相位校正后,再由(14)即可解调出 $m(n)$ 。

由于在数字域内,频率和相位的关系是简单的一阶差分关系,如公式(13)所示。在实际中,要想准确实现调频信号的解调,差分鉴频必须满足以下要求^{[6][7]}:

- (a)、相邻的两个相位差应限制在 $[-\pi, \pi]$ 内,否则出现相位跳变。
- (b)、当相位差大于 2π 时,应进行模 2π 处理。

4FSK 相干解调的实现方框图如下:

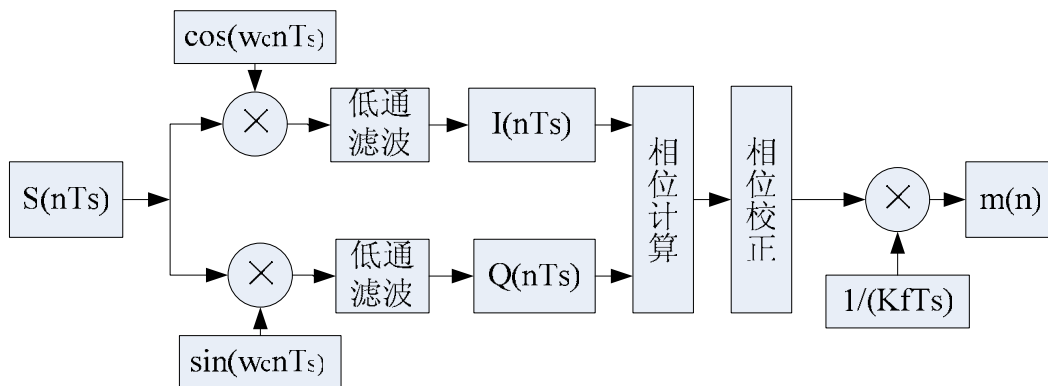


图 6 4FSK 相干解调方框图

最后将解调后的信号 $m(n)$ 经过匹配滤波器后,再经过抽样判决,可获得四电平符号,由标准中的表 1 所示对应关系,可将四电平符号再映射为二进制比特流。

2.4 软件实现方案

按照上节的算法分析及调制、解调方框图,做出软件实现方案图如图 7 所示。

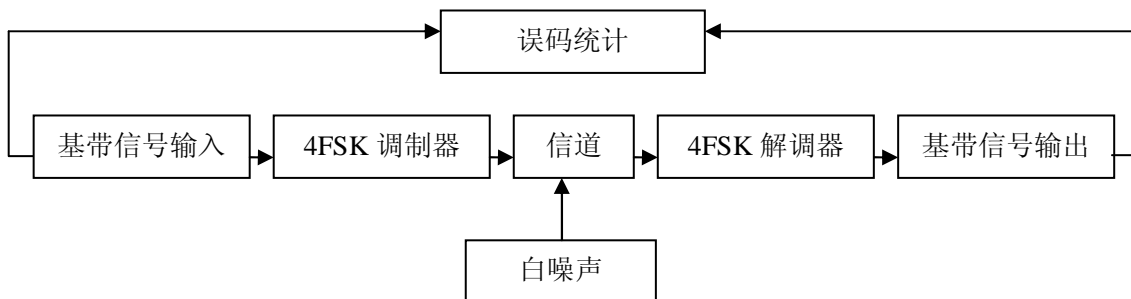


图 7 4FSK 调制解调软件实现方案图

3. 软件实现结果

本文给出了软件实现 DMR 系统中 4FSK 调制解调过程中的详细结果。

3.1 调制过程仿真实现结果

先将截取的二进制比特流按奇、偶位分开，再按照前面表 1 所示的映射关系，将二进制序列映射为四电平符号，得到的四电平符号局部如下图 8 所示：

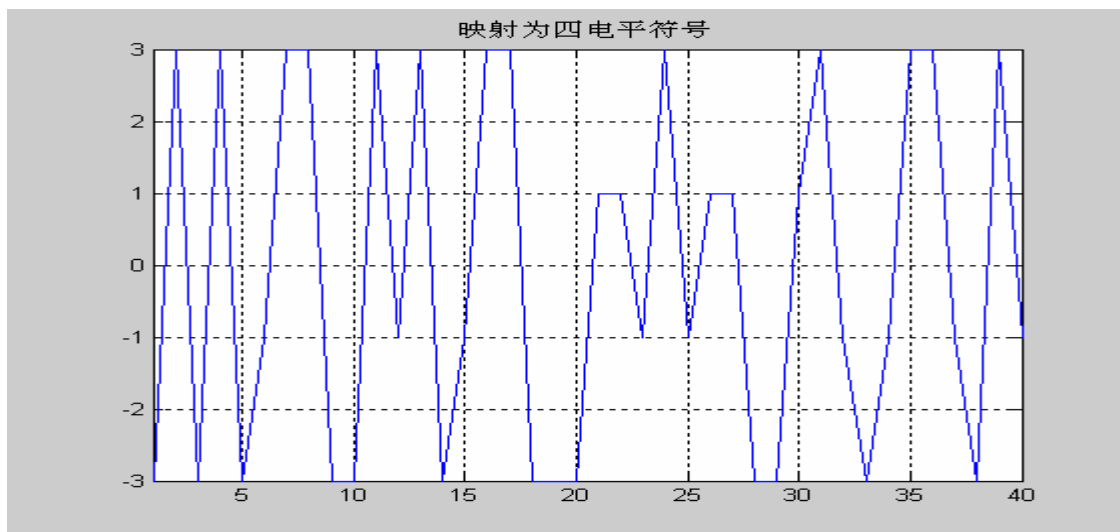


图 8 将二进制比特流映射为四电平符号

对四电平符号进行插值滤波，并进行平滑滤波后得到输入调制信号 $m(n)$ ，滤波器即为前面介绍的平方根升余弦滤波器。

插值滤波后生成的局部的与上述显示四电平符号对应的输入调制信号 $m(n)$ 显示如下图 9:

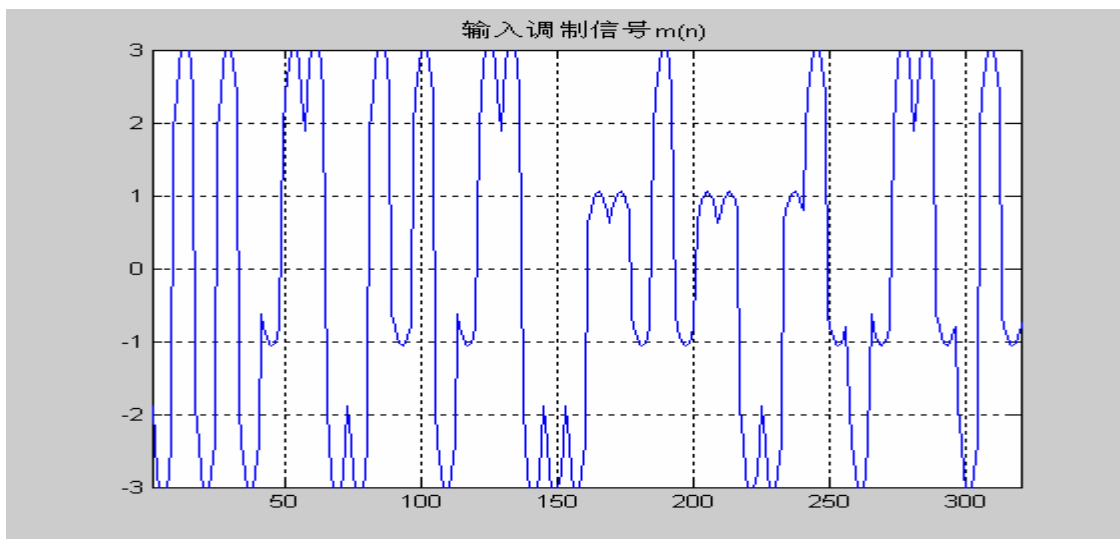


图 9 输入调制信号 $m(n)$

做输入调制信号 $m(n)$ 的频谱(由于重在观察调频前后频谱的搬移情况，为便于观察，取频谱的绝对值，并将零频时图形转换至图的正中来显示)，如下图 10:

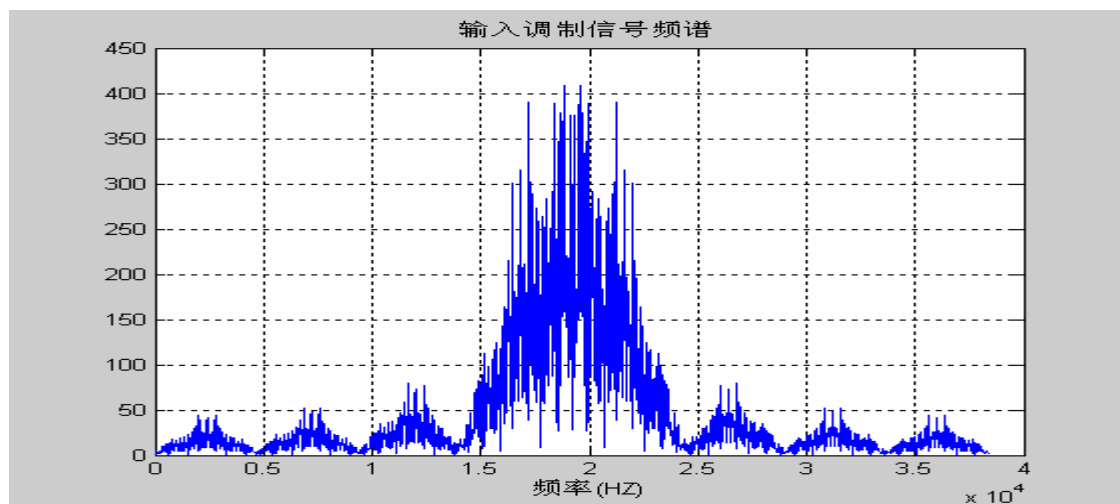


图 10 输入调制信号m(n)的频谱

做出调制输出信号的频谱如下图 11 所示(为便于观察频谱的搬移情况,取了频谱的绝对值,并将零频时的图形转换到了图的正中间显示,若未转换,频谱边带在载频+ f_c 与 $-f_c$ 周围分布),显然可以看到,调制过程实现了频谱的搬移,将输入调制信号的频谱由低频搬移到了中频 f_c 处。

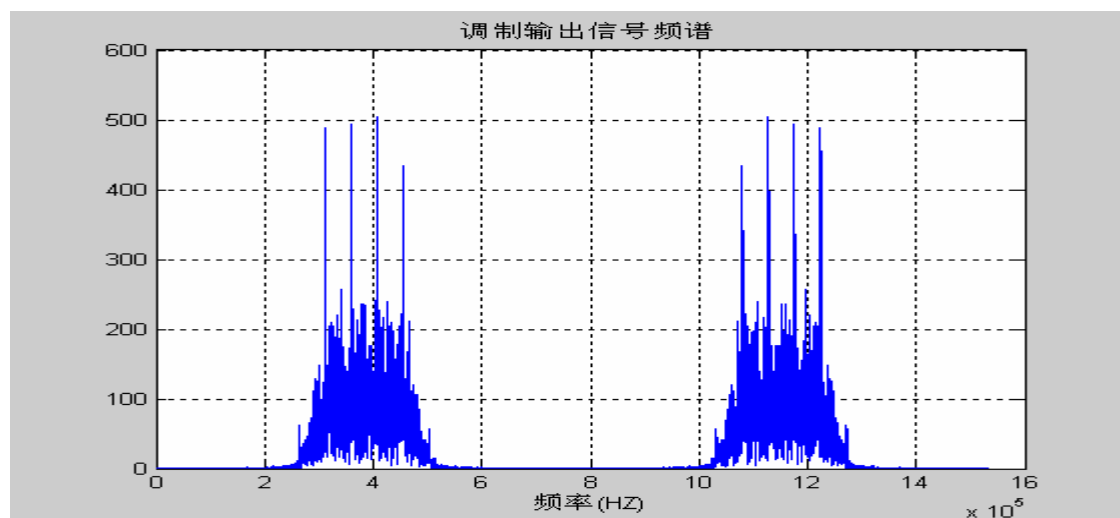


图 11 调制输出信号频谱

3.2 解调过程仿真实现结果

将调制输出信号输入到传输信道进行传输。在信道中由于存在干扰,则到达接收端的在调制输出信号基础上附加了高斯白噪声。下面开始解调过程。

我们采用相干解调方式对其进行解调。将接收到信号分别乘上本地载波 $\cos(\omega_c n T_s)$ 与 $\sin(\omega_c n T_s)$ 后通过低通滤波器,滤掉高频分量,然后对其进行抽样,可得到 I_{k2} 与 Q_{k2} 。用 I_{k2} 与 Q_{k2} 计算相位,应用(14)式,就可以得到解调后的序列。显示如下图 12。

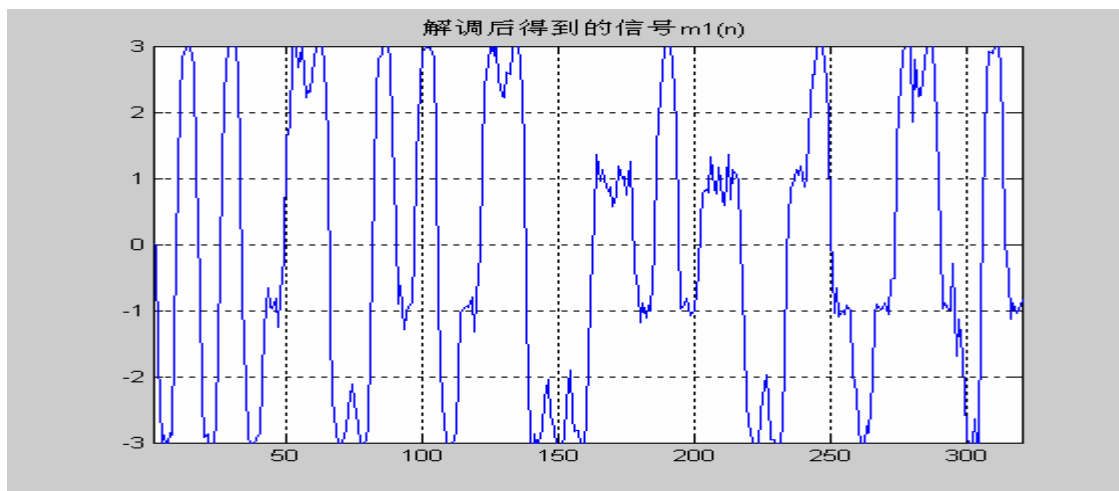


图 12 解调后得到的信号

做解调后得到的信号的频谱(为便于观察, 取了频谱的绝对值, 并将零频转换至了图的正中显示), 显示如下图 13:

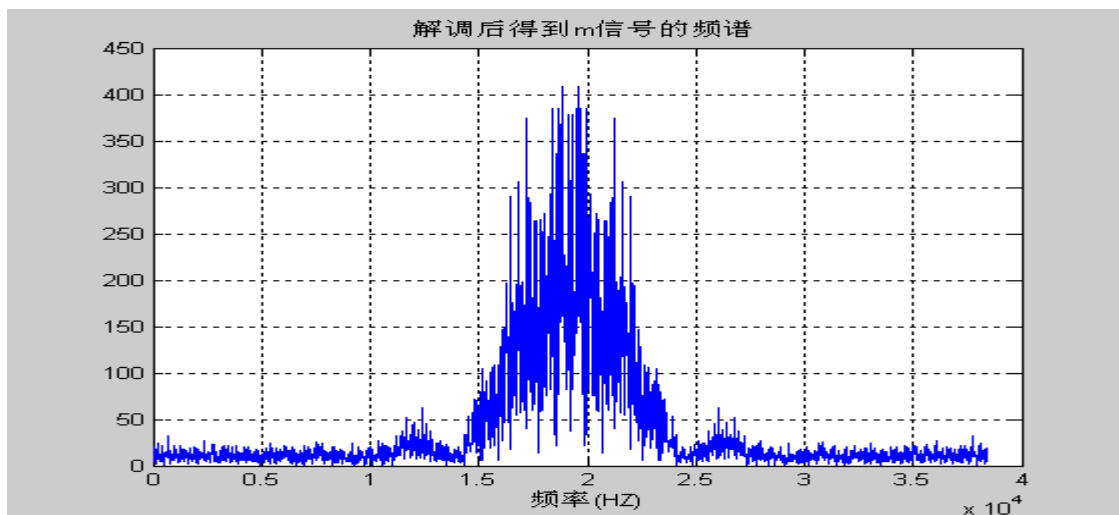


图 13 解调后得到信号的频谱

对产生的解调后信号每 8 点取一个抽样点, 得一新序列, 对按下面三个门限+2, 0, -2 依次进行抽样判决, 即可得到解调后的四电平符号。

解调出的四电平符号局部显示如下图 14:

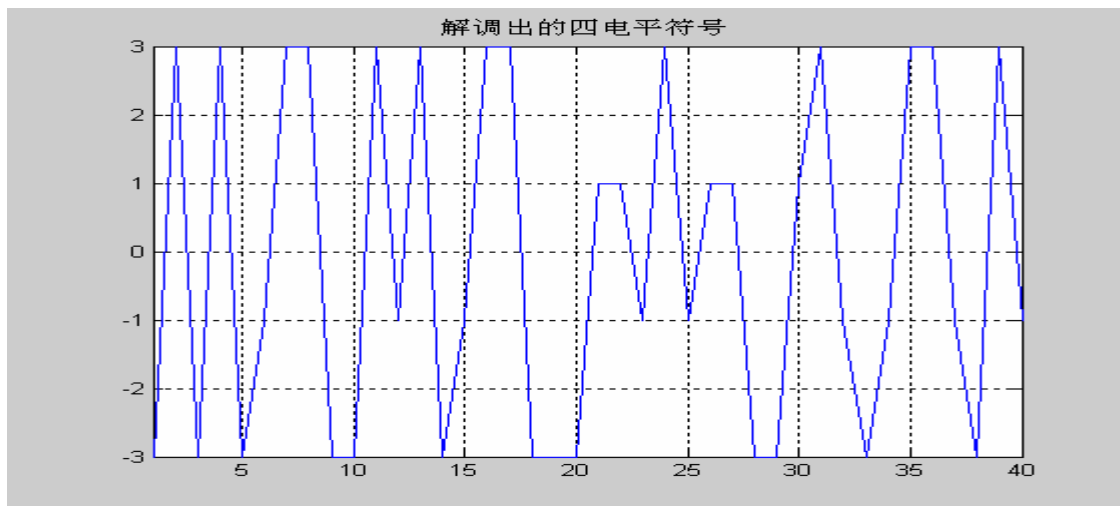


图 14 解调后得出的四电平符号

按照与表 1 相反的过程, 将该四电平符号反映射为二进制序列, 即可完成解调过程。

3.3 误码率计算

输入二进制比特流与输出二进制比特流均为二进制序列, 则二者对应不同的位即为误码位, 统计出误码位的个数, 则可求出此过程的误码率来。使信噪比发生改变, 则误码率也相应发生变化, 可以做出误码率与信噪比之间的关系图。

误码率与信噪比关系如下图 15 所示:

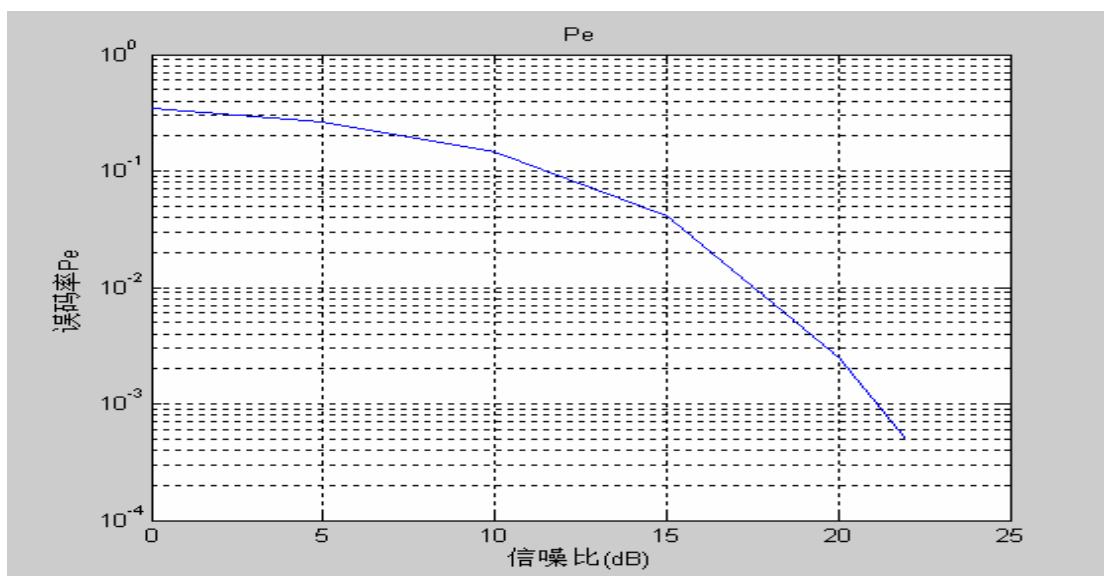


图 15 信噪比与误码率关系图

由上面误码率与信噪比的关系图, 我们可以看到, 在这种相干解调方式中, 随着信噪比的增大, 误码率逐渐降低, 与实际信道是相吻合的。

4. 结论

本文详细介绍了一种数字对讲机系统(DMR)的物理层中的 4FSK 调制解调的技术, 对 4FSK 调制解调的原理进行了分析, 完成了电平映射、波形成型、解调等部分的设计, 并用

MATLAB 对其进行了软件仿真实现。仿真在中频上进行。并对其通过高斯白噪声信道后的性能进行了分析。

参考文献

- [1] 李长春. TDD 数字对讲机的设计与实现 [D]. 西南交通大学硕士学位论文. 2006. 03.01. PP.15.
- [2] 焦东林, 王世诚. PIC16C54 单片机在手持对讲机信令呼叫中的应用 [EB/OL]. 电子技术. 1995 年. 第 12 期. PP.11-12.
- [3] 王宇寰. 基于声码器的 900MHz 数字对讲机研究 [D]. 西安电子科技大学博士学位论文. 2007.01. PP.12
- [4] ETSI TS 102 361-1 V1.3.1 (2006-09). Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters(ERM); Digital Mobile Radio(DMR) Systems; Part 1: DMR Air Interface (AI) protocol. PP.99-104.
- [5] 李长春, 陈向东, 陈永翱. 数字对讲机 TDD 通信协议的设计与实现. 中文核心期刊《微计算机信息》(管控一体化). 2006 年, 第 22 卷, 第 11-3 期. PP.132-134.
- [6] 孙秀睿. 中频 PCM/FM 信号全软化 FM 解调的一种实现方法. 电讯技术. 2005 年, 第 1 期. PP.142-145.
- [7] 徐以涛, 李浩, 王金龙等. 软件无线电中调频波形的正交解调. 解放军理工大学学报(自然科学版). 2006 年 8 月, 第 7 卷, 第 4 期. PP.312-315.

The Research and Analysis of the Performance of 4FSK Modulation& Demodulation in the DMR System

Chen Junjie

College of Information and Telecommunication Engineering, Beijing University of Posts & Telecommunication, Beijing, PRC (100876)

Abstract

The DMR protocol is a new digital telecommunication protocol proposed by ETSI in 2004, and have a bright future. In this paper, the current situation and the future development of the DMR is analyzed and the 4FSK modulation and demodulation of it is simulated by MATLAB. Suppose the transfer channel is an AWGN channel. The performance of this system is analyzed by calculating the BER.

Keywords: DMR; 4FSK; modulation; demodulation

作者简介: 陈俊洁, 女, 1985 年生, 硕士研究生, 主要研究方向是信号与信息处理。