

基于复调制解调的MSK的实现方法

王焕菊¹, 赵秋宇², 王奎甫³, 张德喜², 孙刚⁴

(1. 许昌职业技术学院, 河南 许昌 461000; 2. 许昌学院, 河南 许昌 461000;
3. 许继昌南通信设备有限公司, 河南 许昌 461000; 4. 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

摘要: 提出了一种采用复调制解调的方法实现最小频移键控(MSK), 该方法根据输入的数据比特产生复低通信号, 接着进行低通滤波、复调制从而实现MSK的复调制; 对MSK输入信号进行抽样、复解调、低通滤波得到MSK的复低通信号, 将复低通信号与其延迟后的共轭信号进行复数相乘并对所得到的积的虚部进行判决从而完成MSK的非相干复解调。最后还采用Matlab仿真验证了该方法的正确性和有效性。

关键词: 最小频移键控; 频带利用率; 复调制; 复解调; 非相干解调; DSP

The implementation of MSK based on complex modulation and complex demodulation

WANG Huan-ju¹, ZHAO Qiu-yu², WANG Kui-fu³, ZHANG De-xi², SUN Gang²

(1. Xuchang Vocational Technical College, Xuchang 461000, China; 2. Xuchang University, Xuchang 461000, China;
3. XJ Changnan Communication Co., LTD, Xuchang 461000, China; 4. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A novel method of using complex modulation and complex demodulation to implement MSK is brought forward, according to the bit value of the input data to produce complex low-pass signal, following the signal is low-pass filtered and complex modulated to finish complex modulation, the input MSK signal is sampled, then complex demodulated and low-pass filtered to obtain complex low-pass signal, the signal and the conjugated of its delayed version are multiplied together, according to image part of the product to decide to finish complex demodulation. Simulation in Matlab is used to validate correctness and effectiveness of the method.

Key words: MSK; bandwidth efficiency; complex modulation; complex demodulation; noncoherent differential demodulation; DSP

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1673-3415(2008)15-0023-04

0 引言

远动系统作为电力通信网的重要组成部分, 其传输质量直接关系到电力系统电网及相关自动化的安全稳定和经济运行, 这就要求远动系统具有很高的安全性、可靠性以及迅速更新数据的能力。由于载波通道上存在的噪声比较大、干扰比较强、通道衰减波动严重, 在综合考虑远动传输带宽和强抗干扰能力以及抗衰落能力的情况下采用最小频移键控(MSK)来传输信息。传统的最小频移键控(MSK)信号的调制与解调方法有很多种, 通常采用实信号处理的方法来实现, 由于最小频移键控信号是一种正交调制^[1], 因此可以用复低通信号进行分析和处理^[2,3], 本文介绍采用复调制解调的方法来实现

最小频移键控(MSK)。

1 最小频移键控(MSK)信号复调制与复解调的方法

1.1 最小频移键控(MSK)信号

二进制最小频移键控(MSK)信号的表达式可写成^[1]

$$s(t) = \cos[2\pi f_c t + \theta(t)] \quad (1)$$

$$\text{其中: } \theta(t) = \frac{\pi a_k}{2T_b} t + \varphi_k \quad kT_b \leq t \leq (k+1)T_b \quad (2)$$

式中: f_c 为中心频率; T_b 为码元宽度; a_k 与第 k 个输入码元有关, 其取值 ± 1 ; φ_k 是第 k 个输入码元中

的相位常数, 在时间 $kT_b \leq t \leq (k+1)T_b$ 中保持不变。如果设二进制最小频移键控(MSK)信号的传输速率为 r_b , 频偏为 f_Δ , 发送数据“0”码时信号频率为 f_2 , $a_k=1$; 发送数据“1”码时信号频率为 f_1 , $a_k=-1$; 则

$$r_b = 1/T_b \quad (3)$$

$$f_1 = f_c - \frac{1}{4}r_b \quad (4)$$

$$f_2 = f_c + \frac{1}{4}r_b \quad (5)$$

$$f_\Delta = \frac{1}{4}r_b \quad (6)$$

二进制频移键控的两个信号波形的相关系数为^[1]

$$\rho = \frac{\sin 2\pi(f_2 - f_1)T_b}{2\pi(f_2 - f_1)T_b} + \frac{\sin 4\pi f_c T_b}{4\pi f_c T_b}$$

由于最小频移键控是一种正交调制, 其信号波形相关系数为 0, 而等号后面的第一项等于 0, 因此第二项也必须等于 0。

即:

$$f_c = \frac{m}{4T_b} = \frac{m}{4}r_b, \quad m=1,2,3,\dots \quad (7)$$

相位常数 φ_k 的选择应保证信号相位在码元转换时刻是相位连续的。

1.2 二进制最小频移键控(MSK)信号的数字复调制方法

由于远动的传输速率一般为 300 bit/s、600 bit/s、1200 bit/s、2400 bit/s 等, 为了便于信号处理, 取抽样速率 f_s 为 r_b 的整数倍^[4], 因此在二进制频移键控调制与解调系统中选取:

$$f_s = 9600 \text{ Hz} \quad (8)$$

由式(1)可将最小频移键控(MSK)数字复信号表达式写成为:

$$s(n) = e^{j[2\pi f_c n / f_s + \theta(n)]} \quad (9)$$

对式(9)进行整理:

$$s(n) = e^{j\theta(n)} e^{j2\pi f_c n / f_s} \quad (10)$$

令: $c(n) = e^{j\theta(n)}$, $c(n)$ 为复低通信号, 则由式(10)可以得到:

$$s(n) = c(n) e^{j2\pi f_c n / f_s} \quad (11)$$

从式(11)可以看出, 最小频移键控(MSK)信号可以由复低通信号进行复调制得到, 图 1 是最小频移键控(MSK)信号的数字复调制原理框图。

设最小频移键控(MSK)信号的初始相位 $\varphi_0=0$,

$$\theta(n) = \theta(n-1) + \frac{\pi a_k r_b}{2f_s} = \theta(n-1) + \Delta\theta \quad (12)$$

式中: $\Delta\theta = \pi a_k r_b / (2f_s)$

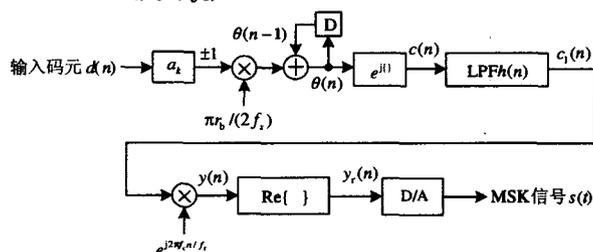


图 1 二进制最小频移键控(MSK)信号数字复调制框图

Fig.1 Diagram of MSK digital complex modulation

当输入数据 $d(n)=0$ 时, $a_k=1$, $\Delta\theta=\pi r_b/(2f_s)$, 当输入数据 $d(n)=1$ 时, $a_k=-1$, $\Delta\theta=-\pi r_b/(2f_s)$, $c(n) = e^{j\theta(n)}$ (13)

对复低通信号 $c(n)$ 进行低通滤波, 抑制带外频谱成分:

$$c_1(n) = c(n) * h(n) \quad (14)$$

式中: * 代表卷积, $h(n)$ 是实系数低通滤波器 LPF 的冲激响应, 其通带宽度与传输速率有关。

对复低通信号 $c_1(n)$ 进行数字复调制,

$$y(n) = c_1(n) e^{j2\pi f_c n / f_s} \quad (15)$$

取 $y(n)$ 的实部, 得到最小频移键控(MSK)实信号:

$$y_r(n) = \text{Re}\{y(n)\} \quad (16)$$

将数字信号 $y_r(n)$ 进行数模转换(D/A)输出二进制频移键控模拟信号:

$$s(t) = \cos[2\pi f_c t + \theta(t)] \quad (17)$$

从整个复调制处理过程可以看出, 由数字复调制得到的二进制频移键控信号其相位是连续的, 因此满足最小频移键控(MSK)信号在码元转换时刻相位是连续的要求。

1.3 二进制最小频移键控(MSK)信号的数字复解调方法

从二进制最小频移键控信号中恢复传输的数据可以用实信号相干解调和实信号非相干解调, 相干解调的抗干扰能力优于非相干解调。但由于相干解调需要在接收端进行载波提取及同步, 实现起来比较复杂, 非相干解调方式实现简单, 无需恢复出同步的载波, 非相干解调有包络检测法、鉴频法、过零检测法、差分解调法^[5-10], 因此本文介绍采用复解调方法实现最小频移键控信号的非相干差分解调^[3]。

如图 2 所示为二进制最小频移键控(MSK)信号的数字复解调框图, 接收端的输入信号 $s(t)$ 经过模数转换(A/D)变成数字信号 $s(n)$,

$$s(n) = 2\cos[2\pi f_c n / f_s + \theta(n) + \varphi] =$$

$$e^{j[2\pi f_c n l / f_s + \theta(n) + \varphi]} + e^{-j[2\pi f_c n l / f_s + \theta(n) + \varphi]} \quad (18)$$

将 $s(n)$ 进行数字复解调得:

$$c(n) = s(n) e^{-j[2\pi f_c n l / f_s + \theta(n) + \varphi]} = e^{j[\theta(n) + \varphi]} + e^{-j[2\pi f_c n l / f_s + \theta(n) + \varphi]} \quad (19)$$

信号 $c(n)$ 通过实系数低通滤波器 $h(n)$ 滤除掉有用信号带外的干扰以及 f_c 的倍频成分:

$$x(n) = c(n) * h(n) = e^{j[\theta(n) + \varphi]} \quad (20)$$

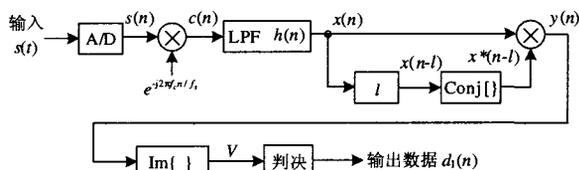


图 2 二进制最小频移键控 (MSK) 信号数字复解调框图

Fig.2 Diagram of MSK digital complex demodulation

实系数低通滤波器 LPF 的通带宽度与传输带宽有关, 可以选用有限冲激响应滤波器 (FIR) 或无限冲激响应滤波器 (IIR) 来实现。

复信号 $x(n)$ 经 l 个整数倍的抽样周期延迟后得到复信号 $x(n-l)$, 注意 l 必须小于一个码元内的抽样点数, 即: $l < f_s / r_b$

然后取复信号 $x(n-k)$ 的共轭再与 $x(n)$ 相乘,

$$y(n) = x(n) x^*(n-l) = e^{j[\theta(n) + \varphi]} \cdot e^{-j[\theta(n-l) + \varphi]} = e^{j[\theta(n) - \theta(n-l)]} \quad (21)$$

取 $y(n)$ 的虚部:

$$V = \text{Im}\{ e^{j[\theta(n) - \theta(n-l)]} \} = \sin[\theta(n) - \theta(n-l)] = \sin[\pi a_k r_b l / (2f_s)] \quad (22)$$

由于 $l < f_s / r_b$, 则: $\pi r_b l / (2f_s) < \pi/2$,

因此在 $1 \leq l < f_s / r_b$ 的范围内选取 l 的值, 可以得到:

$$\pi r_b l / (2f_s) < \pi/2 \quad (23)$$

当 $a_k = 1$ 时, $0 < \pi a_k r_b l / (2f_s) < \pi/2$, $\sin[\pi a_k r_b l / (2f_s)] > 0$, $V > 0$, 输出数据 $d_1(n) = 0$ 。

当 $a_k = -1$ 时, $-\pi/2 < \pi a_k r_b l / (2f_s) < 0$, $\sin[\pi a_k r_b l / (2f_s)] < 0$, $V < 0$, 输出数据 $d_1(n) = 1$ 。

从上述的分析可以看出, 由于二进制最小频移键控信号的复解调方法基于输入信号与其延迟信号的比较, 对传输通道所产生的延迟失真对最终的解调结果不会产生影响, 因此最小频移键控信号的数字复解调性能优于包络检测法、鉴频法、过零检测法, 其抗噪声性能可参见参考文献 [7~10]。

2 二进制最小频移键控 (MSK) 信号的数字复调制与复解调实现方案

二进制最小频移键控 (MSK) 信号的数字复调制与复解调利用 RS232 接口转换器、音频编解码器 (CODEC)、高速 DSP (数字信号处理)、微控制器

(MCU) 等来实现 (如图 3 所示)。由数据终端输出的数据信号 (“1” 或 “0”) 经 RS232 接口转换器进行电平转换后送到 DSP, DSP 进行数据检测、相位累加并生成复低通信号, 对复低通信号作低通滤波、复调制, 取复调制信号的实部, 然后通过音频编解码器 (CODEC) 的 D/A 输出二进制最小频移键控的实带通模拟信号。接收到的二进制最小频移键控 (MSK) 实带通模拟信号经音频编解码器 (CODEC) 的 A/D 转换成数字信号并送到 DSP, DSP 进行复解调、低通滤波、非相干解调恢复出原始的数据信号。PC 机通过微控制器 (MCU) 对二进制最小频移键控信号的中心频率 f_c 、传输速率 r_b (300 Bd、600 Bd、1200 Bd)、异同步以及发送电平等等调制与解调参数进行设置, 以满足最小频移键控信号各种传输协议的要求。图 4 采用 Matlab 语言以抽样频率 $f_s = 9.6$ kHz、数据速率 $r_b = 600$ Bd、 $f_c = 750$ Hz 为例的二进制最小频移键控信号调制与解调信号仿真波形图。

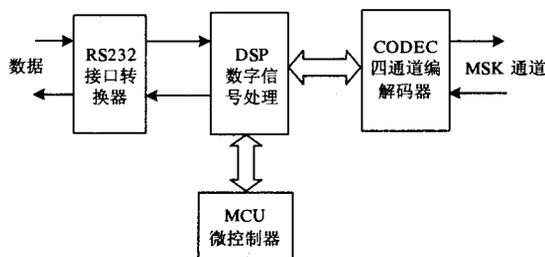


图 3 二进制最小频移键控 (MSK) 数字复调制与解调硬件框图

Fig.3 Hardware block diagram of digital complex modulation-demodulation of MSK

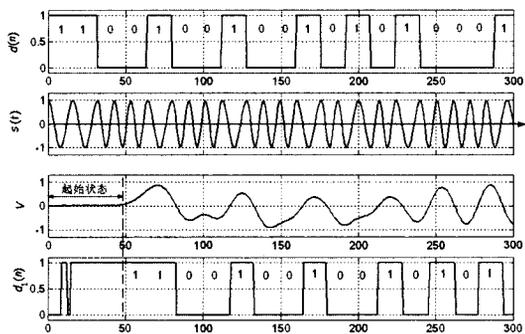


图 4 $f_s = 9.6$ kHz, $r_b = 600$ Bd, $f_c = 750$ Hz 的 MSK 信号波形图

Fig.4 Signal wave diagram of MSK ($f_s = 9.6$ kHz, $r_b = 600$ Bd, $f_c = 750$ Hz)

3 结束语

二进制最小频移键控是数字通信中频带效率高、抗干扰能力强的一种调制方式, 本文首次介绍

采用数字复调制与数字复解调的方法来实现二进制最小频移键控(MSK)信号的传输,该方法大大地降低了信号处理算法的复杂程度,提高了系统的灵活性,在硬件和软件不变的情况下,能够满足二进制最小频移键控(MSK)各种传输协议的要求。

参考文献

- [1] 郭梯云,刘增基,王新梅,等.数据传输[M].北京:人民邮电出版社,1998.
GUO Ti-yun,LIU Zeng-ji, WANG Xin-mei,et al. Data Transmission[M].Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 1998.
- [2] 王奎甫.复信号处理在电力线载波通信中的应用[J].电力系统自动化,2006,30(14):41-45.
WANG Kui-fu. The Application of Complex Signal Processing in Power Line Carrier Communication[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(14):41-45.
- [3] 赵秋宇,王焕菊,王奎甫.基于复信号处理的二进制频移键控(2FSK)的实现方法[J].电力系统自动化,2008,32(2):84-87.
ZHAO Qiu-yu, WANG Huan-ju, WANG Kui-fu. The Implementation of 2FSK Based on Complex Signal Processing[J].Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2):84-87.
- [4] 王靖,王焕菊.基于数字信号处理的二进制频移键控(2FSK)的实现方法[J].石油仪器,2007,21(6):79-81.
WANG Jing, WANG Huan-ju. The Implementation of 2FSK Based on Digital Signal Processing[J]. Petroleum Instruments ,2007,21(6):79-81.
- [5] 谭扬林,程京.数字通信原理[M].北京:电子工业出版社,2001.
TAN Yang-lin,CHENG Jing. Digital Communication Principle[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry , 2001.
- [6] 倪维桢,高鸿翔.数据通信原理[M].北京:北京邮电大学出版社,2002.
NI Wei-zhen,GAO Hong-xiang. Data Communications Principle[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2002.
- [7] 樊昌信,张甫翊,徐炳祥,等.通信原理[M].北京:国防工业出版社,2001.
FAN Chang-xin, ZHANG Fu-yu, XU Bing-xiang,et al. Communications Principle[M]. Beijing:Publishing House of National Defence Industry, 2001.
- [8] 刘丁,杨幸芳,李琦.一种2FSK解调算法的DSP实现[J].现代电子技术,2004,27(3):84-86.
LIU Ding,YANG Xing-fang,LI Qi. A DSP Implementation of 2FSK Demodulation Algorithm[J]. Modern Electronics Technique, 2004,27(3):84-86.
- [9] 陈霞,朱勤专,丁锦滔.FSK信号的非相干数字解调技术[J].电讯技术,2005,45(2):162-164.
CHEN Xia,ZHU Qin-zhuan,DING Jin-tao.Noncoherent Digital Demodulation Technology of FSK Signals[J]. Telecommunication Engineering,2005,45(2):162-164.
- [10] 郭敦俊.CPFSK调制解调算法研究及其DSP实现[J].电子科技,2004,(3):15-19.
GUO Dun-jun. A Study of the CPFSK Modulation-Demodulation Method and Its DSP Realization[J]. IT Age,2004,(3):15-19.

收稿日期:2007-11-23; 修回日期:2008-01-23

作者简介:

王焕菊(1956-),女,本科,副教授,研究方向为机电设计与教学研究;E-mail:whj1956n@yahoo.com.cn

赵秋宇(1964-),女,本科,副教授,研究方向为数字信号处理;

王奎甫(1963-),男,本科,教授级高级工程师,从事电力系统通信以及数字信号处理的研究和开发工作。

国家财政部关税司领导莅临许继调研

7月12日上午,国家财政部关税司司长王伟一行5人莅临许继集团公司,就国家四部委《关于落实国务院加快振兴装备制造业若干意见有关进口税收优惠政策的通知》(财关税[2007]11号)相关政策的实施情况进行调研。省财政厅副厅长鲁秩,市委常委、常务副市长杨献波陪同。

集团公司领导李富生、檀国彪、王定国等陪同王伟司长参观了柔性输电系统公司、德理施尔电气公司、产品展厅和特高压工程试验研究中心。

在随后举行的座谈会上,李总向调研组汇报了许继重大装备产品(特高压交直流输变电设备)的生产与销售,关键零部件进口以及未来行业的发展规划等有关情况。王伟司长向大家详细介绍了“11号文件”出台的背景,解析了相关政策及操作流程。市财政局负责人和集团公司领导就11号文件的理解、实施与调研组交流了意见,提出了建议。

作为我国电力装备行业的大型骨干和龙头企业,许继集团不断加快技术创新步伐的发展战略,加快重大装备的国产化步伐,努力掌握自主核心技术。连续承担了多项国家级、省级重点装备科研项目,极大地推动了我国电力装备行业的发展,产生了巨大的经济和社会效益。