

参数未知条件下 MSK 信号解调算法

赛景波, 郭英龙, 杨善景, 曹速成
(北京工业大学 电控学院, 北京 100124)

摘要: 提出一种对未知参数的二进制 MSK 信号进行解调的新方法。给出了解调原理、解调程序流程、信号速率判决方法、单个码元确定方法, 最后给出了 Matlab 仿真结果。分析了解调程序优化方式、实际应用中应注意的编码方式及低通滤波问题。

关键词: MSK 解调; Matlab 仿真; 算法

中图分类号: TP391, TN247

文献标识码: A

The demodulation algorithm of the MSK signal of unknown parameters

SAI Jing Bo, GUO Ying Long, YANG Shou Jing, CAO Su Cheng

(College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A new demodulation technology of unknown parameters MSK (minimum frequency shift keying) has been put forward. The paper introduces the principle of demodulation, the process flow chart of demodulation and the way to access baud rate and single element. Finally, the simulation is achieved in order to verify the method to demodulation theory. In conclusion, optimization approach to demodulation progress, and notes including encoding and LPF in Practical application are discussed.

Key words: demodulation of MSK; simulation of Matlab; algorithm

最小频移键控(MSK)解调方法有很多种, 一般将其作为特殊的 FSK 信号解调, 其他有利用相位信息解调^[1]、利用 MSK 信号特殊点 FFT 的实部或虚部比较判决解调^[2]、基于 DFT 的 MSK 信号数字化解调算法^[3]、基于复调制解调的 MSK 的实现算法^[4]等。上述方法共同点是只适用于参数已知和相位同步的 MSK 信号, 在参数(波特率、同步信息)未知系统中不适用。本文从时域对信号进行分析, 通过计算信号相邻零点长度的方差确定信号传输速率, 利用 MSK 信号上下边频与信号传输速率之间的关系确定单个码元, 进而实现在未知参数条件下 MSK 信号的数字化解调, 并确定出信号速率。

1 参数未知条件下 MSK 数字解调原理

MSK 信号数学表达式^[7]:

$$S_{\text{msk}}(t) = \cos[2\pi(f_c + (B/4) \times u_k)t + x_k] \quad k=1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

$$kT_b \leq t \leq (k+1)T_b$$

式中, u_k 是宽度为 T_b 、取值为 1 或 -1 的 NRZ 信号; x_k 是为保证在 $t=kT_b$ 处相位连续而加入的相位常数; B 为信

号传输波特率。 x_k 满足以下递推关系:

$$x_k = x_{k-1} + (x_{k-1} - u_k) \times (k\pi/2) \quad k=0, 1, 2 \dots \quad (2)$$

对 MSK 信号进行分析可知, 信号上边频 $f_1 = f_c + B/4$, 下边频 $f_2 = f_c - B/4$, 信号带宽 $BW = B/2$, 对信号进行带通采样^[5-6], 采样率 $f_s = f_c / (2m+1)$, 采样后数字信号表达式为:

$$S_{\text{msk}}(n/f_s) = \cos[2\pi(f_c + (B/4) \times u_k)(n/f_s) + x_k]$$

$$S_{\text{msk}}(n) = \cos[2\pi(nf_c/f_s + B \times u_k \times n/4f_s) + x_k] \quad (3)$$

$$= \cos[2\pi((m \times f_s + \Delta f) \times n/f_s + B \times u_k \times n/4f_s) + x_k]$$

$$= \cos[2\pi(n\Delta f/f_s + B \times u_k \times n/4f_s) + x_k] \quad (4)$$

式中, $f_c = m \times f_s + \Delta f$, 从中可以看出, 经过 f_s 带通采样^[5]后, 信号的载频由中频 f_c 变换为低频 Δf , 上边频 $f_1 = \Delta f + B/4$, ($\Delta f < f_s$) 下边频 $f_2 = \Delta f - B/4$ 信号带宽 $BW = B/2$, 保持不变, 1 个码元内的采样点数为 B/f_s 。

下面计算采样后边频在 1 个码元区间的周期数 T_n (周期数=码元长度/边频周期), 以及 MSK 信号相邻两个零点的长度 L 。

$$T_n = f_s(\Delta f \pm B/4) / B \quad (5)$$

$$L = 0.5f_s / \Delta f \pm B/4 \quad (6)$$

MSK 信号相邻零点组成一组随机变量 $L(n)$ 。其中期望和方差为：

$$E[L(n)] = 0.5f_s / \Delta f$$

$$\sigma[L(n)] = E[L - E(L)]$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (0.5f_s / \Delta f \pm B/4 - 0.5f_s / \Delta f)^2$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (B/4)^2 = (B/4)^2 \quad (7)$$

由(5)、(6)和(7)可以看出，当中频输出与采样频率确定时有以下结论：

(1) $L \propto (B/4)^2$ 、 $T_n \propto (1/B)$ 、 $L \propto B$ ；

(2) 利用公式(7)可以判定信号传输速率；

(3) 在速率判定的条件下，上下边对应的 L 、 T_n 为定值；

(4) 由(7)可知，在 1 个码元内的正弦波周期 T_n 确定、周期长度 $2L$ 可计算的情况下，单个码元可定。

故通过速率判决，计算 L 、 T_n ，确定单个码元，可解调 MSK 信号。上下边频，码元采样率 T_n 之间的具体关系如表 1 所示， Δf 为采样后信号载频， B 为信号波特率。1 个码元包括 $2T_n$ 个长度为 L 的区间。

表 1 上下边频、码元采样率 T_n 之间关系

| 码元 | 边频 | 相邻零点长度 L_n | 单码元区间采样点数 | 单区间正弦波周期数 T_n |
|----|-----------|-----------------------------|-----------|---------------------------|
| 1 | 上边频 f_1 | $0.5f_s / (\Delta f + B/4)$ | f_s / B | $f_s(4\Delta f + B) / 4B$ |
| -1 | 下边频 f_2 | $0.5f_s / (\Delta f - B/4)$ | | $f_s(4\Delta f - B) / 4B$ |

2 参数未知条件下 MSK 数字解调算法流程

本方法充分利用数字正弦波信号周期与相邻过零点长度的关系，通过计算信号的过零点距离的方差确定信号传输速率，在给定信号速率前提下，MSK 信号边频频率、码元周期内边频周期个数唯一确定。所以，通过先验的信号速率、边频频率和码元周期内边频周期个数即可解调出 MSK 信号。MSK 解调示意图如图 1 所示，算法流程如下：

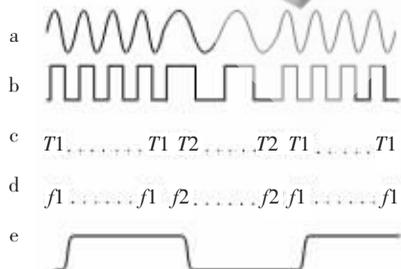


图 1 MSK 解调流程图解

(1) 输入正弦波 MSK 数字信号 $S_{msk}(n) = \cos[2\pi(nf_c/f_s + n \times B \times u_k / 4f_s) + x_k]$ 。

(2) 以零点为比较门限，将输入的正弦波序列变换为方波序列 $A_{msk}(n)$ ；

$$A_{msk}(n) = \begin{cases} 1 & S_{msk}(n) > 0 \\ -1 & S_{msk}(n) < 0 \end{cases} \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

(3) 计算出方波信号的宽度 L_n' $n=1, 2, 3 \dots N$

(4) 计算 L_n' 的方差，利用公式(7)估计信号传输速率 B ；

(5) 利用公式(5)、(6)计算 L 、 T_n ；

(6) 顺序统计 T_n' $n=1, 2, 3 \dots$ 记录相同 L_n' 的个数，利用表 1 确定信号单个码元。

根据表 1 分析出单个码元。解调完成。

3 Matlab 仿真

3.1 载频相同采样率不同情况下各种参数计算方法和相应的参数表

为了验证该方法的正确性，本文使用了 Matlab 语言编程进行了软件仿真研究。仿真参数如下：数字信号码元速率为 2 400 b/s，调制后载频频率为 10.7 MHz，“1”码元对应的载波频率为 $f_1 = 10.7 \text{ MHz} + 600 \text{ Hz}$ ，“0”码元对应的载波频率为 $f_2 = 10.7 \text{ MHz} - 600 \text{ Hz}$ ，带通采样频率为 $f_s = 0.345 \text{ MHz}$ 。

由 $f_c = m \times f_s + f$ 可以得到经过抽取后信号的载频为

$$f = f_c - m \times f_s = 10.7 \text{ MHz} - 0.345 \text{ MHz} \times 31 = 0.005 \text{ MHz}$$

MSK 信号过零点(半周期长度)为 $L = f_s(2 \times f_1 \text{ 或 } f_2)$ ；

1 个码元对应的 L 的个数公式为， $N = f_s / (B \times T_1 \text{ 或 } T_2) = 2 \times f_1 \text{ 或 } f_2 / B$ 。应该注意 1 个码元内的采样点的数目大于相邻频率间隔。

$$f_s / B \geq f_s / 2, f_2 \Rightarrow 2 f_2 \geq B$$

$$\Rightarrow 2(f - B/4) \geq B$$

$$\Rightarrow 2(f_c - m \times f_s - B/4) \geq B$$

$$\Rightarrow f_c - m \times f_s \geq 3 \times B/4$$

将各种速率下，经 0.345 MHz 采样后得到的 0 和 1 码元所对应的频率 f_1 和 f_2 及 f_1 和 f_2 对应的相邻频率的宽度 T_1 和 T_2 以及各个信号速率下 1 和 0 码元所对应频率的宽度 T_1 和 T_2 的数目 N_1 和 N_2 绘制成表格，如表 2 所示。

表 2 载频为 5 kHz 的各个速率对应参数表 ($f_s = 0.345 \text{ MHz}$)

| B/(b/s) | 1 200 | 2 400 | 4 800 | 9 600 | 19 200 |
|------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|
| F1/Hz | 5 300 | 5 600 | 6 200 | 7 400 | 9 800 |
| F2/Hz | 4 700 | 4 400 | 3 800 | 2 600 | 200 |
| 码元 f_s/B | 287.500 0 | 143.750 0 | 71.875 0 | 35.937 5 | 17.968 8 |
| T_1 | 32 | 30 | 27 | 23 | 17.602 0 |
| T_2 | 36 | 39 | 45 | 66 | 862.5 |
| N_1 | 9 | 5 | 2.66 | <1 不适用 | <1 不适用 |
| N_2 | 8 | 4 | 1.597 2 | <1 不适用 | <1 不适用 |

从表 2 可以看出，参数未知的 MSK 信号的解调受

网络与通信 Network and Communication

到波特率的限制。当波特率为 9 600 b/s、19 200 b/s 时，由于采样率较低，单位码元内采样点较少，使得信号不能被正确解调。此时需要增大采样频率或者增大带通采样后得到的实际频率 f 。增大解调后频率的参数表如表 3 所示。由表 3 可知，如果带通采样后得到的实际频率 f 过大，则 0 和 1 码元对应的频率差别相对减小，这将对低速率信号的解调带来影响，甚至不能实现解调。解决该问题的方法是，对低速率的 MSK 信号尽量使带通采样后得到的实际频率值 f 小，对高速率的 MSK 信号可以通过增加采样率或是增加 f 的方法来实现解调^[6]。对于监测系统，在判断出信号速率后针对不同速率的信号做出相应的处理。这里的处理主要是离散信号插入和抽取，包括分数和整数倍抽取。

表 3 载频为 15 kHz 的各个速率对应参数表 ($f_s=0.534\ 3\ \text{MHz}$)

| B(b/s) | 1 200 | 2 400 | 4 800 | 9 600 | 19 200 |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| $F1(\text{Hz})$ | 15 300 | 15 600 | 16 200 | 17 400 | 19 800 |
| $F2(\text{Hz})$ | 14 700 | 14 400 | 13 800 | 12 600 | 10 200 |
| 码元 | 445.250 0 | 222.625 0 | 111.312 5 | 55.656 3 | 27.828 1 |
| $T1$ | 17.460 8 | 17.125 0 | 16.490 7 | 15.353 4 | 13.492 4 |
| $T2$ | 18.173 5 | 18.552 1 | 19.358 7 | 21.202 4 | 26.191 2 |
| $N1$ | 25.500 0 | 13.000 0 | 6.750 0 | 3.625 0 | 2.062 5 |
| $N2$ | 24.500 0 | 12.033 8 | 5.750 0 | 2.625 0 | 1.062 5 |

3.2 软件处理流程

信号流程图如图 2 所示。



图 2 利用软件解调参数未知 MSK 信号的流程图

3.3 仿真结果

仿真时发送数字为 123...91122...99，发送形式为十六进制。MSK 信号波特率为 2 400 b/s，信号载频 $f_c=$

10.7 MHz，采样率为 $f_s=0.345\ \text{MHz}$ 。码元采用差分曼彻斯特编码。下变频后的信号波形如图 3 所示。解调出的数据如表 4 所示。

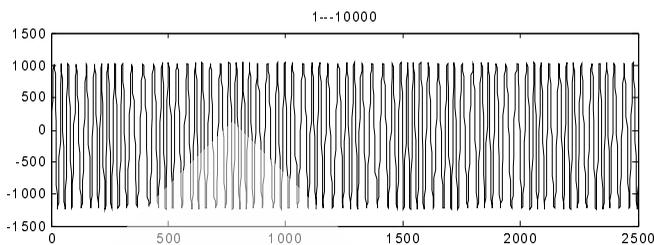


图 3 MSK 下变频后信号波形图

本算法利用欠采样实现数字下变频，减少信号数据量，使信号实时解调成为可能；为保证信号解调的正确性，在下变频需要对信号进行低通滤波；将波特率、上下边频、单码元周期之间的关系做为先验值与实际监测到的数据进行比较，通过查表的方式实现程序优化；实际应用信号速率、周期等的计算要考虑信源编码方式。本算法能对未知参数 MSK 信号进行解调，能判决信号传输波特率。

参考文献

- [1] 尚俊娜. 一种基于相位信息的 MSK 软件解调方法[J]. 无线通信, 2005, 1(10): 12-16.
- [2] 许少峰, 申振宁. MSK 信号的数字解调新方法[J]. 现代电子技术, 2005, 193: 119-120.
- [3] 胡敏, 肖大光. 一种 MSK 信号的数字化解调新算法[J]. 计算机仿真, 2007, 24(10): 123-125.
- [4] 王焕菊, 赵秋宇. 基于复调制解调的 MSK 的实现方法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(15): 23-26.
- [5] 刘丽华, 赵宗印. 软件无线电中的带通采样分析[J]. 信号与信息处理, 2007, 37(1): 26-29.
- [6] 王秀琴, 范艳根. 软件无线电中的降采样率技术[J]. 黑龙江科技学院学报, 2007, 17(4): 274-277.
- [7] 沈伟慈, 张玉兴. 通信电路[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.

(收稿日期: 2009-06-12)

表 4 解调出的码元和数据

| | |
|------|---|
| 解出码元 | 10 11 00 10 10 11 01 01 01 00 11 01 01 00 10 10 10 11 00 10 |
| 差分解码 | 0 1 1 0 0 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 0 1 1 0 |
| 解出码元 | 10 11 00 10 10 11 00 10 10 11 00 10 10 11 00 10 11 01 01 01 |
| 差分解码 | 0 1 1 0 0 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 1 0 1 0 0 0 |
| 解出码元 | 01 00 11 01 00 10 10 10 10 11 00 10 11 01 00 10 10 11 00 10 |
| 差分解码 | 0 1 1 0 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 1 0 0 1 1 0 |
| 解出码元 | 11 01 00 10 10 11 00 10 11 00 10 10 10 11 00 10 11 00 10 10 |
| 差分解码 | 1 0 1 0 0 1 1 0 1 1 0 0 0 1 1 0 1 1 0 0 0 |
| 解出码元 | 10 11 00 10 11 00 11 |
| 差分解码 | 0 1 1 0 1 1 1 |
| 差分解码 | 0110010001100100011001100110011001001000011010000110101 |
| 解出数据 | 32 32 33 33 34 34 35 |