

一种新型 MSK 调制器的设计

薛晓峰, 周国安, 高军, 刘贵宾

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要:通过分析传统 MSK 调制器的原理,从中找出了调制器系数间更直接的依赖关系,从而提出了一种新的 MSK 调制器模型,该模型与传统的模型相比结构简单,实现容易,在可靠性及实时性方面都有所提高。

关键词:恒定包络调制;最小频移键控;MSK 调制器

中图分类号: TN919.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2004)06-0040-04

为适应数字通讯、光纤通讯和卫星通讯的传输特性,近几年,围绕充分节省频谱和高效率利用频带,提出了恒定包络调制方式,而最小频移键控 MSK (Minimum Shift Keying) 就是其中的一个典型方式。它主要特点是这类已调信号具有幅度不变的特性,其发射机功率放大器可以工作在线性状态,而不引起严重的频谱扩散;接收机可用限幅器消除信号衰落的影响,从而提高抗干扰性能^[1]。因此,被广泛应用于第二代数字移动通信 GSM 体制之中^[2]。但传统 MSK 多采用触发电路来实现,实时性不甚理想,本文采用了全新的判决电路来弥补了这一不足。

1 MSK 调制信号的产生机理

1.1 MSK 表达式的数学推理

MSK 是一种特殊的 2FSK (二进制频移键控)。2FSK 信号通常是有两个独立的震荡源产生,一般来说在频率转换处相位不连续,因此,会造成功率谱产生很大的旁瓣分量,若通过带限系统后会产生信号包络的起伏变化。为了克服以上缺点,需控制在频率转换处相位变化是连续性的,这种形式的数字频率调制称为相位连续的频移键控 (CPFSK),MSK 属于 CPFSK,但因其调制指数最小,在每个码元持续时间 T_s 内,频移恰好引起 $\pi/2$ 相移变化,所以称这种调制方式为最小频移键控 MSK^[3]。

MSK 信号可表示为

$$S_{\text{MSK}} = \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi a_k}{2T_s} t + \varphi_k\right) \quad kT_s \leq t \leq (k+1)T_s \quad (1)$$

下面讨论第 k 个码元相位变化情况 (即除载波相位之外的附加相位)

$$\theta_k(t) = a_k \frac{\pi t}{2T_s} + \varphi_k \quad kT_s \leq t \leq (k+1)T_s \quad (2)$$

根据相位连续的条件,要求在 $t = kT_s$ 时满足

$$\theta_{k-1}(kT_s) = \varphi_k(kT_s) \quad (3)$$

即

$$a_{k-1} \frac{\pi k T_s}{2T_s} + \varphi_{k-1} = a_k \frac{\pi k T_s}{2T_s} + \varphi_k \quad (4)$$

可得

$$\varphi_k = \varphi_{k-1} + (a_{k-1} - a_k) \frac{\pi k}{2} \quad (5)$$

收稿日期:2004-04-11

基金项目:军队科研基金项目

作者简介:薛晓峰(1981-),男,山西运城人,硕士生,主要从事电子对抗研究。

将式(2)代入式(1),得

$$S_{\text{MSK}} = \cos[\omega_0 t + \theta_k(t)] \tag{6}$$

式中, $\theta_k(t) = a_k \frac{\pi k}{2T_s} + \varphi_k$, $a_k = \pm 1$, $\varphi_k = 0$ 或 π 。

利用三角函数将式(1~6)展开得

$$S_{\text{MSK}} = \cos \varphi_k(t) \cos \omega_0 t - \sin \theta_k(t) \sin \omega_0 t \tag{7}$$

式中:

$$\cos \theta_k(t) = \cos\left(\frac{\pi k}{2T_s} a_k + \varphi_k\right) = \cos\left(\frac{\pi k}{2T_s} a_k\right) \cos \varphi_k - \sin\left(\frac{\pi k}{2T_s} a_k\right) \sin \varphi_k = \cos\left(\frac{\pi k}{2T_s}\right) \cos \varphi_k \tag{8}$$

$$\sin \theta_k(t) = \sin\left(\frac{\pi k}{2T_s} a_k + \varphi_k\right) = \left[\sin\left(\frac{\pi k}{2T_s} a_k\right) \cos \varphi_k + \cos\left(\frac{\pi k}{2T_s} a_k\right) \sin \varphi_k\right] = a_k \sin\left(\frac{\pi k}{2T_s}\right) \cos \varphi_k \tag{9}$$

将式(8)和式(9)代入式(7),有

$$S_{\text{MSK}} = \cos \varphi_k \cos\left(\frac{\pi k}{2T_s}\right) \cos \omega_0 t + a_k \cos \varphi_k \sin\left(\frac{\pi k}{2T_s}\right) \sin \omega_0 t = I_k \cos\left(\frac{\pi k}{2T_s}\right) \cos \omega_0 t + Q_k \sin\left(\frac{\pi k}{2T_s}\right) \sin \omega_0 t$$

式中: $kT_s < t < (k+1)T_s$, $I_k = \cos \varphi_k$, 为同相分量; $Q_k = -a_k \cos \varphi_k$, 为正交分量。具体调制参数状态见表 1。^[3]

表 1 调制参数状态图

a_{k-1}	a_k	φ_{k-1}	φ_k	$\cos \varphi_k$	$-a_k \cos \varphi_k$
1	1	0	0	1	-1
1	-1	0	π	-1	-1
-1	1	0	π	0	1
-1	-1	π	π	-1	-1
-1	1	0	π	-1	1
-1	-1	0	0	1	1
1	1	π	π	-1	1
1	-1	π	0	1	1

1.2 MSK 调制器的实现

根据以上的分析,可采用正交调幅方式产生 MSK 信号,如图 1 所示。首先将输入的二进制信号进行差分编码。经串/并变换,将一路延迟 T_s ,得到相互交错一个码元宽度的两路信号 I_k 和 Q_k ,然后用加权函数 $\cos(\pi t/2T_s)$ 和 $\sin(\pi t/2T_s)$ 分别对两路数据信号 I_k 和 Q_k 进行加权,加权后的两路信号在分别对正交载波 $\cos \omega_0 t$ 和 $\sin \omega_0 t$ 进行调制,调制后的信号相加后通过带通滤波器,就得到 MSK 信号^[4]。

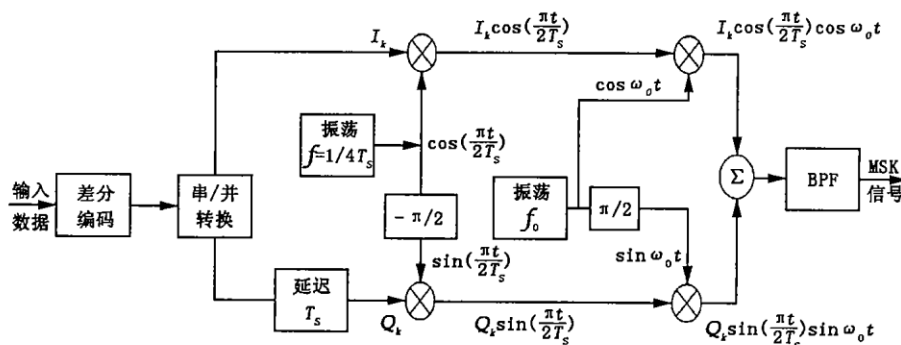


图 1 MSK 调制器原理框图

2 一种新的 MSK 调制信号产生机理

2.1 a_k 与 I_k 和 Q_k 的关系

2.1.1 a_k 与 I_k 的关系

$$I_k = \cos \varphi_k = \cos \left[\varphi_{k-1} + (a_{k-1} - a_k) \frac{\pi k}{2} \right]$$

$$I_k = \cos(\varphi_{k-1} \pm k\pi) = \begin{cases} \cos \varphi_{k-1} = I_{k-1} & (a_k = a_{k-1}) \\ \cos \varphi_{k-1} = I_{k-1} & (a_k = a_{k-1} \text{ 且 } k \text{ 为偶数}) \\ -\cos \varphi_{k-1} = -I_{k-1} & (a_k = -a_{k-1} \text{ 且 } k \text{ 为奇数}) \end{cases}$$

当 k 为偶数时

$$\varphi_k = \varphi_{k-1}$$

当 k 为奇数时

$$\varphi_k = \begin{cases} \varphi_{k-1} (a_k = a_{k-1}) \\ -\varphi_{k-1} (a_k = -a_{k-1}) \end{cases}$$

由于 a_k 与 I_k 的取值范围 (± 1) 相同, 则当 I_k, a_k 的初始值相同即 $I_0 = a_0$ 时, $I_k = a_k$ 。

2.1.2 a_k 与 Q_k 的关系

$$Q_k = -a_k \cos \varphi_k = -a_k \cos \left[\varphi_{k-1} + (a_{k-1} - a_k) \frac{\pi k}{2} \right]$$

$$Q_k = \begin{cases} -a_{k-1} \cos \varphi_{k-1} = \varphi_{k-1} (a_k = a_{k-1}) \\ -a_k \cos(\varphi_{k-1} \pm k\pi) \end{cases} = \begin{cases} -a_{k-1} \cos \varphi_{k-1} = Q_{k-1} & (a_k = -a_{k-1} \text{ 且 } k \text{ 为奇数}) \\ a_{k-1} \cos \varphi_{k-1} = -Q_{k-1} & (a_k = -a_{k-1} \text{ 且 } k \text{ 为偶数}) \end{cases}$$

当 k 为奇数时

$$\varphi_k = \varphi_{k-1}$$

当 k 为偶数时

$$\varphi_k = \begin{cases} \varphi_{k-1} (a_k = a_{k-1}) \\ -\varphi_{k-1} (a_k = -a_{k-1}) \end{cases}$$

同样由于 a_k 与 Q_k 的取值范围 (± 1) 相同, 则当 a_k, Q_k 的初始值相同时即时 $a_0 = Q_0$, 则 $a_k = Q_k$ 。

2.2 新的 MSK 调制信号产生原理

在以上分析的基础上, 可以得出 I_k 与 Q_k 只不过是 a_k 的表现方式。可直接从 MSK 调制信号的表达式出发来构建原理框图。选取 $I_0 = a_0 = 1$, 此时, $\varphi_0 = 0$, 可由表 1 得到表 2。

又有下列关系式:

当 $\varphi_k = 0$ 时: $S_{\text{MSK}} = \cos\left(\frac{\pi t}{2T_s}\right) \cos \omega_0 t - a_k \sin\left(\frac{\pi t}{2T_s}\right) \sin \omega_0 t$

当 $\varphi_k = \pi$ 时: $S_{\text{MSK}} = -\left[\cos\left(\frac{\pi t}{2T_s}\right) \cos \omega_0 t - a_k \sin\left(\frac{\pi t}{2T_s}\right) \sin \omega_0 t \right]$

当 $a_{k-1} = 1, a_k = 1$ 时: $S_{\text{MSK}} = \cos\left(\frac{\pi t}{2T_s}\right) \cos \omega_0 t - a_k \sin\left(\frac{\pi t}{2T_s}\right) \sin \omega_0 t$

当 $a_{k-1} = 1, a_k = -1$ 时: $S_{\text{MSK}} = -\left[\cos\left(\frac{\pi t}{2T_s}\right) \cos \omega_0 t - a_k \sin\left(\frac{\pi t}{2T_s}\right) \sin \omega_0 t \right]$

当 $a_{k-1} = -1, a_k = 1$ 时: $S_{\text{MSK}} = \cos\left(\frac{\pi t}{2T_s}\right) \cos \omega_0 t - a_k \sin\left(\frac{\pi t}{2T_s}\right) \sin \omega_0 t$

当 $a_{k-1} = -1, a_k = -1$ 时: $S_{\text{MSK}} = -\left[\cos\left(\frac{\pi t}{2T_s}\right) \cos \omega_0 t - a_k \sin\left(\frac{\pi t}{2T_s}\right) \sin \omega_0 t \right]$

同样选取 $I_0 = a_0 = -1$, 此时, $\varphi_0 = \pi$ 可由表 1 得到表 3。

同样可得, $a_{k-1} = 1, a_k = -1$ 时, $S_{\text{MSK}} = \cos\left(\frac{\pi t}{2T_s}\right) \cos \omega_0 t - a_k \sin\left(\frac{\pi t}{2T_s}\right) \sin \omega_0 t$;

当 $a_{k-1} = 1, a_k = -1$ 时: $S_{\text{MSK}} = -\left[\cos\left(\frac{\pi t}{2T_s}\right) \cos \omega_0 t - a_k \sin\left(\frac{\pi t}{2T_s}\right) \sin \omega_0 t \right]$

当 $a_{k-1} = -1, a_k = 1$ 时: $S_{\text{MSK}} = \cos\left(\frac{\pi t}{2T_s}\right) \cos \omega_0 t - a_k \sin\left(\frac{\pi t}{2T_s}\right) \sin \omega_0 t$

当 $a_{k-1} = -1, a_k = -1$ 时: $S_{\text{MSK}} = -\left[\cos\left(\frac{\pi t}{2T_s}\right) \cos \omega_0 t - a_k \sin\left(\frac{\pi t}{2T_s}\right) \sin \omega_0 t \right]$

直接通过对 a_k 的判决就可实现 MSK 调制信号。具体调制原理如图 2 所示。

首先将输入的二进制信号 a_k 分为两路。一路输入判决器判决: 若 $a_0 = 1$, 使 a_k (a_k 包括 a_0) 保持不变; 若 $a_0 = -1$, 令 a_k 取反。具体判决电路如图 3 所示。; 另一路与加权函数 $\sin(\pi t/2T_s)$ 和正交载频信号 $\sin \omega_0 t$ 之积相乘后再与另一加权函数 $\cos(\pi t/2T_s)$ 和正交载频信号 $\cos \omega_0 t$ 之积相加, 将相加得到的信号输入带通

表 2 a_k 与 φ_k 关系图 ($\varphi_0 = 0$)

a_k	a_{k-1}	φ_k
1	1	0
-1	1	π
1	-1	0
-1	-1	π

表 3 a_k 与 φ_k 关系图 ($\varphi_0 = \pi$)

a_k	a_{k-1}	φ_k
1	1	π
-1	1	0
1	-1	π
-1	-1	0

滤波器后与 a_k 的判决信号相乘,就得到 MSK 调制信号。

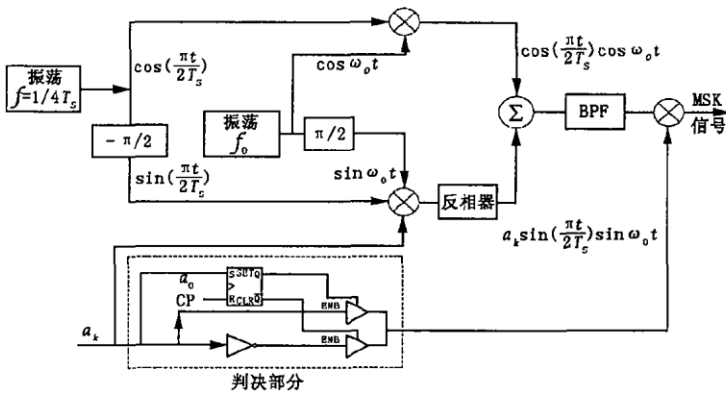


图2 新型 MSK 调制器原理框图

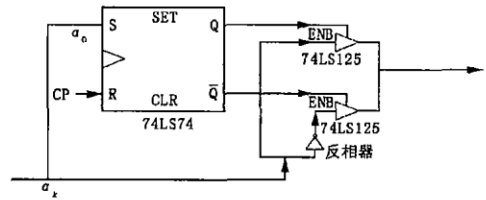


图3 判决电路电路图

3 结论

与传统的 MSK 调制电路比较起来,新型调制电路用一个判决电路代替差分编码和串并转换两个元件,提高了整个调制信号电路的性能:

- 1) 判决电路的结构比差分编码电路和串并转换电路都要简单,提高了调制电路的可靠性;
- 2) 串并转换一般都采用触发电路来产生,其实时性没有判决电路高。因此,采用判决电路提高了调制电路的实时性;
- 3) 节约了成本,易于电路集成,便于批量生产。

参考文献:

[1] 沈保锁,侯春萍. 现代通讯原理[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
 [2] 曹志刚,钱亚生. 现代通讯原理[M]. 北京:清华大学出版社,1992.
 [3] 张新政. 现代通讯系统原理[M]. 北京:电子工业出版社,1995.
 [4] 王秉钧,孙学军,沈保锁,等. 现代通讯系统原理[M]. 天津:天津大学出版社,1995.
 [5] 郭兴阳,谢德芳. QPSK 数字化解调相位模糊校正方法研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2001,2(1):41-43.

(编辑:田新华)

The Design of a Novel MSK Modulator

XUE Xiao-feng, ZHOU Guo-an, Gao Jun, LIU Gui-bin

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China)

Abstract: By analyzing the principle of the traditional MSK modulator, the more direct dependent relationship among modulator coefficients is found, thereby a novel model of MSK modulator is put forward. By comparison with the traditional model, this model is simple in structure, easy in realization and is improved in reliability and the character of real time.

Key words: invariable envelop modulation; minimum shift keying; MSK modulator