

实现 20 比特/秒/赫兹的无线传输 数字调制算法——VMSK/2

胡剑凌, 徐 盛, 陈 健
(上海交通大学电子工程系, 上海 200030)

摘 要: 本文介绍了一种新的具有极高频带利用率的数字基带调制算法——1/2 甚小频移键控(VMSK/2), VMSK/2 可以在不损失信噪比的前提下极大地压缩信号传输所需的频带. 将 VMSK/2 与模拟单边带抑制载波(SSB-SC)调制方式相结合, 利用现有的硬件技术, 可在射频(RF)传输系统中获得近 20 比特/秒/赫兹(bits/s/Hz)的频带利用率. 本文对 VMSK/2 结合 SSB-SC 的调制方式进行了理论分析, 并给出了仿真结果. 数值实验表明在保证 1.0×10^{-6} 误码率(BER)的前提下, 为实现 20bits/s/Hz 的频带利用率, VMSK/2 结合 SSB-SC 无线传输系统所需的信噪比(SNR)为 13 分贝(dB).

关键词: 1/2 甚小频移键控; 单边带抑制载波; 调制与解调

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2002)08-1153-03

VMSK/2 Modulation for Wireless Data Transmission at 20 Bits/Sec/Hz

HU Jianling; XU Sheng; CHEN Jian

(Dept. of Electronic Eng., Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China)

Abstract: A new algorithm named VMSK/2 for base band modulation is introduced. Using this method, very high band efficiency can be obtained without loss of SNR, which is different from other compression methods such as MPSK, QAM, and so on. By means of current hardware technique, VMSK/2 accompanied with SSB-SC can transmit data at 20 bits/sec/Hz through radio frequency (RF) transmission system. The theory of VMSK/2 is explained in detail and the simulation results are also presented. It shows that VMSK/2 with SSB-SC can obtain 10^{-6} BER and band efficiency of 20 bits/sec/Hz with SNR values of 13 dB.

Key words: VMSK/2; SSB-SC; MODEM

1 引言

目前在数字传输系统中使用较多的调制方式有 MPSK、MSK、QAM 等, 其中 MPSK 和 QAM 有较高的频带利用率. 由于 QAM 根据调制后信号的幅值进行解调, 故一般不在无线通信系统中使用, 而为了保证误码率, MPSK 调制中的 M 一般不超过 8, 即理论频带利用率在 3bits/s/Hz 以下. 为了进一步提高无线传输系统的频带利用率, Walker^[1,2] 等人提出了可变相移键控(VPSK)和甚小频移键控(VMSK)数字基带编码调制方式, 从而可将频带利用率提高到 15bits/s/Hz.

众所周知采用单边带调制方式可将频带利用率提高一倍, 但是在传统的 MPSK、QAM 等调制方式中, 已调信号的上、下两边带一般围绕在载波附近, 如图 1(a) 所示, 由于已调信号的这种频谱特性, 从而提高了单边带技术的应用难度. 而 VPSK 或 VMSK 采用类似曼彻斯特(Manchester)码的双相编码调制方式, 使得已调信号的上、下两边带尽可能地分离开来^[3,4], 如图 1(b) 所示, 从而使单边带调制易于实现.

传统的 MPSK 根据已调信号的相位来恢复信号, 而 VPSK 和 VMSK 则根据已调信号过零点时刻的差异来恢复信号. VPSK 和 VMSK 两者的主要区别在于调制信号每比特所占用时槽长度的特征不同. 在 VPSK

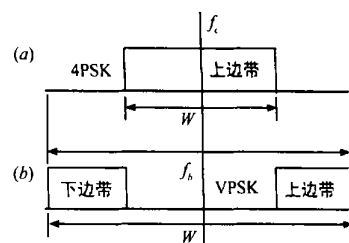


图 1 VPSK 和 4PSK 频谱比较, f_c : 载波频率, W : 调制基带信号带宽, f_b : 数据率

中, 每比特占用的时槽长度根据相邻两比特的值可作 0、1 或 2 个编码时钟的延时, 因此属于滑动编码方式. 在 VMSK 中每比特占用固定的时槽长度, 且每个比特周期编码信号反相两次. 本文所要介绍的 VMSK/2 调制方式将 VPSK 和 VMSK 有效地结合起来, 每个比特占用固定的时槽长度, 且在一个比特周期

内只反相一次,反相时刻由当前比特值确定,从而可以进一步提高频带利用率.

2 VMSK/2 基带编码调制原理

VMSK/2 基带编码采用非归零码(NRZ),每个比特占用固定的时槽长度,且在每个比特周期内编码信号仅反相一次,反相时刻由比特值决定.根据每个比特所占用时钟长度的奇偶情况,VMSK/2 编码信号的反相时刻略有不同.假设在 VMSK/2 编码中,每个比特占用 M 个时钟周期.则当 M 为偶数时,对于比特“1”基带编码信号在第 $M/2 + 1$ 时钟周期后反相,对于比特“0”基带编码信号在第 $M/2$ 个时钟周期后反相.当 M 为奇数时,对于比特“1”基带编码信号在第 $(M+1)/2$ 时钟周期后反相,对于比特“0”基带编码信号在第 $(M-1)/2$ 个时钟周期后反相.图 2(a)和(b)给出了当 M 为 4 时,VMSK/2 基带编码信号的波形及频谱.

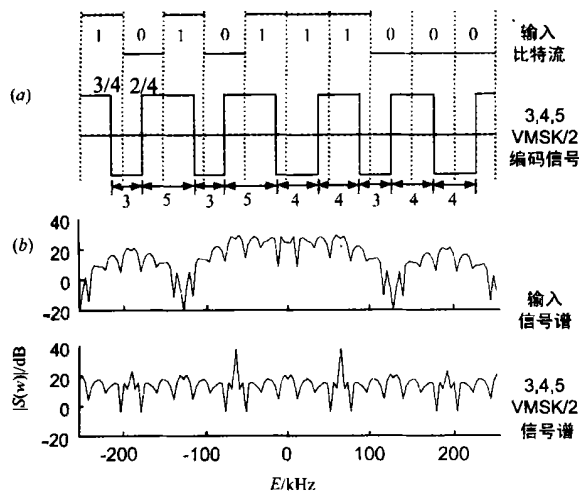


图2 128 kb/s 的 3,4,5 VMSK/2 基带编码波形及频谱

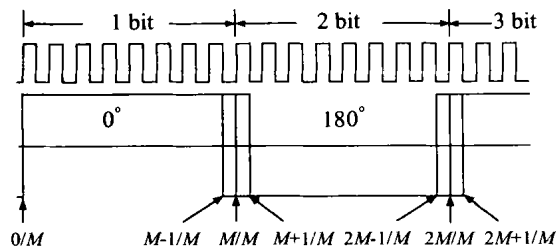


图3 $M-1, M, M+1$ VMSK/2 基带编码信号的理想眼图

根据以上的分析可以得出 M 长度 VMSK/2 的编码规则:

(1) 当相邻两比特为“10”时,编码器输出的双相码在 $M-1$ 个时钟后反相;(2) 当相邻比特为“01”时,双相码在 $M+1$ 个时钟后反相;(3) 当相邻比特为“11”或“00”时,双相码在 M 个时钟后反相.

即时槽长度为 M 的 VMSK/2 基带编码信号的反相时刻有三种可能: $M-1, M$ 和 $M+1$, 因此往往将它称为 $M-1, M, M+1$ VMSK/2 码.根据 VMSK/2 的编码规则可方便得出其解码规则:当检测到信号在 $M-1$ 个时钟后反相时,解码器输出比特“0”.当检测到信号在 $M+1$ 个时钟后反相时,解码器输

出比特“1”;当信号在 M 个时钟后反相时,解码器输出与前一个相同的比特.图 3 给出了 $M-1, M, M+1$ VMSK/2 基带编码信号的理想眼图.另外,VMSK/2 根据编码信号反相时刻的不同来恢复信号,因此可利用这一特点来简单地实现解调端的比特同步.

VMSK/2 基带信号的相移角根据前后比特的不同组合而变化,当信号在 $M-1$ 时钟后反相时,相移角为 $\pi/(M-1)$,而当信号在 $M+1$ 个时钟后反相时,相移角为 $\pi/(M+1)$,因此 VMSK/2 具有 VPSK 的特征.另外 VMSK/2 每个比特占用固定的时槽长度,即具有 VMSK 的特征,但在 VMSK/2 编码中每个矩形波周期包含两个比特信息,类似于将 VMSK 基带信号一分为二,从而可获得更高的频带利用率.

由 VMSK/2 编码规则可知,基带编码信号仅包含 $(2M-1)/M, 2M/M$ 和 $(2M+1)/M$ 三种周期成分,在信源等概的前提下不含直流分量.当传输比特率为 f_b 时,基带编码信号的单边带宽 W_s 为:

$$W_s = \frac{f_b M}{2M-1} - \frac{f_b M}{2M+1} \quad (1)$$

因此采用单边带调制时可获得的频带利用率 Q 为:

$$Q = f_b / W_s = (4M^2 - 1) / (2M) \quad (2)$$

相应的在接收端为保证正确解码允许的最大相角误差 β 应为最小调制角的一半,即:

$$\beta = \frac{\pi}{2(M+1)} \quad (3)$$

表 1 给出了不同 M 下,VMSK/2 基带编码信号的带宽(单边带) W_s 、频带利用率 Q 和最大相角误差 β .

表1 VMSK/2 码特征

VMSK/2 码	$W_s (\times f_b)$	$Q (\text{bits/s/Hz})$	$\beta (\text{度})$
2, 3, 4 VMSK/2	0.6~0.4286	5.83	22.5
3, 4, 5 VMSK/2	0.5714~0.4444	7.87	18
4, 5, 6 VMSK/2	0.5556~0.4545	9.90	15
5, 6, 7 VMSK/2	0.5455~0.4615	11.92	12.8
6, 7, 8 VMSK/2	0.5385~0.4667	13.93	11.2
7, 8, 9 VMSK/2	0.5333~0.4706	15.94	10
8, 9, 10 VMSK/2	0.5294~0.4737	17.94	9
9, 10, 11 VMSK/2	0.5263~0.4762	19.95	8.1

香农(Shannon)理论给出了从有噪信号中解调出调制信号所需的最小信噪比,如式(4)所示.

$$f_b = W \cdot \text{Log}_2 \left[1 + \frac{f_b}{W} \left(\frac{E_b}{N} \right) \right] \quad (4)$$

其中 E_b/N 为比特信噪比.对不同 M 的 VMSK/2 基带编码信号,均有 $f_b/W \approx 1$,因此其香农极限为 0dB,即在 VMSK/2 调制方式中,频带利用率的提高不以信噪比的提高为条件,这一点与 QAM 等其他调制方式有很大不同.误码率与信噪比的关系是衡量调制系统性能的重要指标,下式给出了 VMSK/2 调制系统的误码率表达式^[4]:

$$P_e = \frac{1}{2} \text{erfc} \left[\left(\frac{E_b}{N} Q \beta \right)^{1/2} \right] \quad (5)$$

该误码率只考虑噪声对 VMSK/2 基带编码的影响,而不考虑 RF 引入的误码.以 9, 10, 11 VMSK/2 为例,其 $M=10, Q \approx 20, \beta$

$= \pi/22$, 为获得 10×10^{-6} 的误码率所需的 E_b/N 为 6dB, 若考虑中频(IF)放大和 RF 的损失为 7dB, 则 9, 10, 11 VMSK/2 系统在 20 bits/s/Hz 的频带利用率下, 为获得 1.0×10^{-6} 的误码率所需的 E_b/N 为 13 dB.

3 VMSK/2 射频传输系统

经 VMSK/2 编码后的信号为基带信号, 为了进行无线传输, 还需经过调制将频谱搬移到中频段, 并进一步通过射频电路将信号发射出去. 考虑到 VMSK/2 编码信号的上、下两边带分离, 为提高频带利用率, 可采用单边带抑制载波(SSB SC)的调制方式. 同时为便于在解调端实现载波同步, 应使载波频率等于比特速率的整数倍^[5], 而比特同步可根据 VMSK/2 码反相时刻的差异实现.

图 4 给出了 VMSK/2 射频传输系统的参考框图, 输入的比特流 $b(t)$ 首先经过 VMSK/2 编码得到同相信号 $a(t)$, 将 $a(t)$ 通过 Hilbert 滤波器得到正交信号 $\hat{a}(t)$, 利用 $a(t)$ 和 $\hat{a}(t)$ 得到单边带调制后信号 $x(t)$, $x(t)$ 经上变频后由射频电路发送出去. 接收端将收到的射频信号经过下变频得到信号 $y(t)$, $y(t)$ 是调制信号 $a(t)$ 和信道噪声 $n(t)$ 的混合, 将 $y(t)$ 与本地载波相乘并滤去高频分量便得到解调后信号 $z(t)$, 如式(6)所示.

$$z(t) = [a(t) + n_c(t)] \cos\theta + [\hat{a}(t) + n_s(t)] \sin\theta \quad (6)$$

其中 $n_c(t)$ 和 $n_s(t)$ 分别为窄带噪声 $n(t)$ 的同相和正交分量, θ 为接收端本地载波与发送端载波的相位误差. 由式(6)可知解调器的性能受噪声水平和相角误差 θ 两部分决定. 当相角误差 θ 为零时, 式(6)等号右边仅剩第一项, 则当保证一定的信噪比水平时, 能由 $z(t)$ 来正确地恢复出 $a(t)$. 解调后信号 $z(t)$ 还需通过 VMSK/2 解码器最终得到重建的比特流 $\hat{b}(t)$.

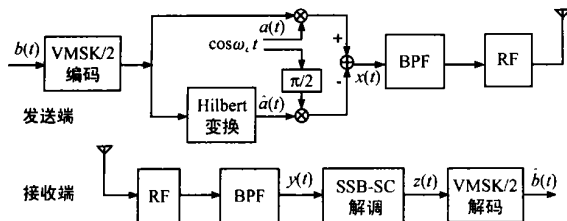


图 4 VMSK/2 射频传输系统框图

4 数值实验

本文设计了数据率为 128kbps 的无线传输系统, 信源采用 3, 4, 5 VMSK/2 ($M=4$) 双相编码, 其频带利用率约为 8 bits/s/Hz, 因此可在 16kHz 带宽的 VHF 系中传输. 本文在数值实验时, VMSK/2 编码时钟为 512kHz, 即为数据率的 4 倍, 载波频率选为 1.024MHz, 等于数据率的 8 倍, 采样频率选为 4.096MHz, 即保证每个编码时钟有 8 个采样点, 以利于过零点(反相时刻)检测.

测试 VMSK/2 无线传输系统的性能应包括两部分内容: 相角误差 θ 对误码率的影响和噪声水平对误码率的影响. 测试时采用了 104 万个比特. 表 2 给出了在假设无噪情况下误码率与相角误差 θ 的关系. 从表 2 可知, 当相角误差 θ 小于 15

时, VMSK/2 可以无误差地恢复出原始信号, 这与表 1 给出的理论分析值相吻合, 即 3, 4, 5 VMSK/2 码允许的最大相角误差为 18. 当 θ 为 20 时, 误码率约为 50%. 本文同时测试了系统对噪声的鲁棒性. 实验中设定信噪比 E_b/N 为 6dB, 其中噪声由伪随机序列产生, 其幅值由信号能量和信噪比共同确定并将它通过一带通滤波器以仿真窄带噪声的特征, 在该条件下得到的误码率为 0.96×10^{-6} , 与理论分析值基本吻合.

表 2 3, 4, 5 VMSK/2 系统误码率 Pe 与相角误差 θ 的关系

θ	$Pe(\%)$
0°	0
10°	0
15°	0
20°	50.7
30°	25.1

5 结论

本文介绍了一种新型的基带信号调制算法 VMSK/2, 将该算法与传统的 SSB SC 调制相结合, 利用现有的硬件技术可实现 20bits/s/Hz 的频带利用率, 而且在相同的误码率下其频带利用率的提高不以信噪比的提高为前提条件. 本文的数值实验表明, 对于 3, 4, 5 VMSK/2 系统, 当载波相角误差控制在 18 以下时, VMSK/2 系统能无误差地恢复原始信号. 同时为保证 1.0×10^{-6} 的误码率, 在考虑 IF 和 RF 损失的情况下, VMSK/2 无线传输系统所需的信噪比为 13dB.

参考文献:

- [1] Walker H R. High speed data communications system using phase shift key coding [P]. U. S. Pats. 4, 742, 532, 5, 185, 765.
- [2] Walker H R. VPSK and VMSK modulation transmit digital audio and video at 15 bits/sec/Hz [J]. IEEE Trans. On Broadcasting, 1997, 43 (1): 96-103.
- [3] Simon M K, Million S. The power spectrum of unbalanced NRZ and biphasic signals in the presence of data asymmetry [A]. TDA Progress Report [R]. 1996. 42-126.
- [4] Walker H R. The advantages of VPSK modulation for data transmission [A]. Proceedings of Weston' 95 [C]. San Francisco: 1995. 454-462.
- [5] Whaits C V, Braun R M. Phase errors in the coherent demodulation of VPSK and a solution using DSSS modulation [A]. Proceedings of COMSIG' 97 [C]. South Africa: 1997. 107-110.

作者简介:



胡剑凌 男, 1973 年 11 月出生于浙江宁波, 2000 年 4 月毕业于上海交通大学电子工程系通信与信息系统专业, 获博士学位, 现为上海交通大学电子工程系副教授, 研究方向为自适应信号处理、多媒体信号处理和多媒体通信等方面, 已发表论文近二十篇.