

# 高效数字调制 VMSK 的错觉<sup>1</sup>

陈晓毅 姚庆栋 刘小成

(浙江大学通信与信息系研究所 杭州 310027)

**摘要** Walker 提出了一种高效率的数字调制方案—VMSK 调制, 根据 Walker 的分析, 它的频带利用率可以达到  $30\text{bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$ , 而且没有能量损失. 该文从工程和信号处理的角度分析了这种调制, 得到了一个非常可惜的结果, 这种调制并没有所说的性能.

**关键词** VMSK, SSB-SC, 数字滤波, 调制

**中图分类号** TN911.3

## 1 引言

H. R. Walker 提出了一种调制方式, 他称之为“Very Minimum Shift Keying” (VMSK). 在他的文章<sup>[1-3]</sup>中称 VMSK 可以达到  $30\text{bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$  或者更高的频谱利用率, 同时又只要传统 BPSK 的功率要求! 文献[4-5]也对 VMSK 进行了说明, 国内也有相关的介绍<sup>[6,7]</sup>. 初看这似乎是一个很诱人的技术, 因为如果事实真的是这样, 那么这将给通信带来一次革命. 现在无线通信中, 一般的频谱利用率也只有  $2\sim 3\text{bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$  左右, 如果能达到  $30\text{bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$ , 则码率可以提高 10 倍! 但是可惜的是, 这种技术并不能实现, 或者说, 它只是一种美丽的错觉. 在以下的部分中, 我们主要分析它的特点及为什么它是不能实现的.

## 2 VMSK 调制技术简介

首先让我们先来看看 VMSK 的基本概念. VMSK 和传统的数字调制方式在频谱上存在着一定的区别. 由于 VMSK 采用了双相编码, 最大的特点是过零点时刻是随数据变化的, 不同的比特占有不同长度的时槽. 画出 VMSK 的眼图如图 1.

把一个比特分成  $M$  个时槽 (这里假定  $M$  为奇数), 记为  $\text{VMSK}(M)$ . 则如果比特为 1, 在  $(M-1)/2$  时刻反相, 如果为 0, 在  $(M+1)/2$  反相. 比如  $M=13$ , 则比特 1 对应于 6 时槽反相, 比特 0 对应于 7 时槽反相. 由于每个比特都有正负的能量, 而且相差不大, 如果从一串长随机数来看, 由于正负抵消, 它的频谱中含低频分量较少<sup>[8]</sup>, 如果加上载波, 两个边带是远离载频分布的 (图 2), 这样的好处是可以滤掉一个边带. 而传统的 MPSK 等是以非归零码 (NRZ) 作为调制信号, 这种二进制其功率谱中有丰富的低频乃至直流分量, 已调信号频谱的上

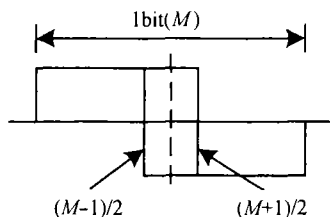


图 1 VMSK 理想眼图

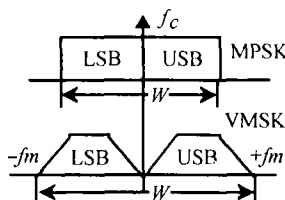


图 2 加上载波后的频谱比较

<sup>1</sup> 2002-06-24 收到, 2002-10-17 改回

下两个边带是紧靠载频集中分布的, 实际中不太可能滤出一个边带。因此, 如果能让 VMSK 工作在 SSB-SC 状态, VMSK 可以达到很高的频带利用率。

图 3 是用计算机模拟的方法得到的一个 VMSK(13) 的基带频谱。从图上看的确大部分能量都集中在很窄的频段内, 而旁边的频谱相比之下要小 30dB 左右, H. R. Walker 称之为 ‘频谱草’ (grass)。如果把这些频谱滤除, 就能达到很高的频谱利用率!

### 3 VMSK 频谱分析

粗从图 3 看, VMSK 大部分的能量的确集中在比特频率  $f_b$  附近。这也可以从 VMSK 的编码特点看出。1bit 的 VMSK 波形由两部分频率组成:  $f_1 = [M/(M-1)]f_b$  和  $f_2 = [M/(M+1)]f_b$ 。Walker 称只要滤波器能通过  $f_1$  和  $f_2$  的频率, 就能恢复原信号。比如  $M = 13$ , 对于 10kbit/s 的比特率,  $f_1 = 10.833\text{kHz}$ ,  $f_2 = 9.2857\text{kHz}$ , 带宽只要  $\text{BW} \approx 1.6\text{kHz}$ 。因此频段利用率  $Q \approx 6\text{bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$ 。但是我们对于这样的频谱特性存在疑惑, 是否真的可以把频谱草滤除, 或者换句话说, 调制信息是在低能量频谱上还是在能量很大的谱线上? 对于这个问题, 引起了许多争议。Walker 本人称调制信息在谱线上, 因此, 可以把低能量频谱部分滤除, 而许多人对此抱有怀疑, 认为调制信息在频谱很宽的低能量部分。从我们的分析来看, 认为调制信息是分布在频带很宽的低能量部分。因此, 在传输时是不能把这些频谱滤除的, 也就是说, VMSK 可以达到高频带利用率是不切合实际的!

让我们再来看看 VMSK 的编码特点, 对于图 1 的眼图, 可以把时域的 VMSK 分解为图 4(a) 的波形, 每一个比特区间都是一样的, 称为调制时钟。而调制信息则体现在图 4(b) 中。如果是 1, 则取中间部分的 ‘1’, 如果是 0, 则取幅度为 ‘-1’, 相加就是 VMSK 的波形。

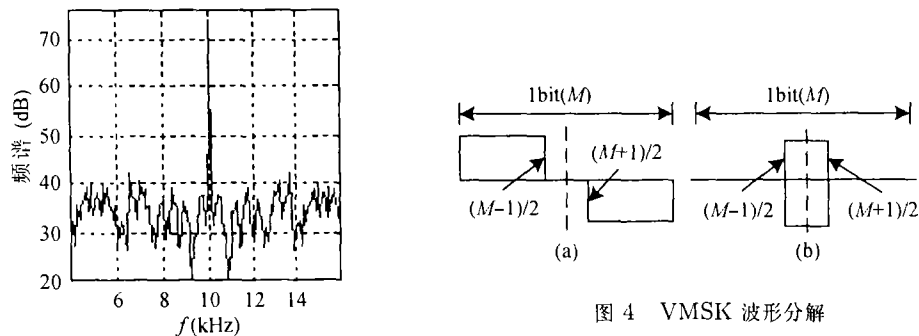


图 3 10kbps 的 VMSK 单边带功率谱

图 4 VMSK 波形分解

$$S_{\text{VMSK}}(t) = S_a(t) + S_b(t) \quad (1)$$

因此, 信号  $S_{\text{VMSK}}(t)$  的傅里叶分析, 为

$$F_{\text{VMSK}}(\omega) = F_a(\omega) + F_b(\omega) \quad (2)$$

对于  $F_a(\omega)$ , 它是一个周期信号, 所以频谱表现为频线, 通过计算得到图 5(a) 的结果, 而表征调制信息的  $F_b(\omega)$  频谱如图 5(b) 所示, 其中的分贝值是相对值。从图中可以看出, 图 3 中出现的谱线其实是由与调制不相关的调制时钟引起的, 这些谱线出现在  $n \times f_b$  的位置。而这个频谱却被 H. R. Walker 等认为是调制信息所在, 图 5(b) 中的调制信息的频谱, 却认为是要被滤除的频谱草 ('grass')。他认为, 这些草是由于进行频谱分析时的积分所引起的, 因为积分的

宽度不一样, 导致会有一个宽度很大的小幅度的低频分量存在, 所以引起了低能量的草。对于能量有限的信号, 傅里叶分析为

$$F_{\text{VMSK}}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t)e^{j\omega t} dt < \infty \quad (3)$$

而它的变化结果的基本波形为:  $C_n = 2A_{av}(\sin n\pi t/T)/(n\pi t/T) = 2A_{av} \sin x/x = 2A_{av} \text{sinc}(x)$ , 其中  $x = n\pi t/T$ ,  $A_{av} = At/T$ 。但是由于每个比特的  $\Delta t$  不一样, 造成  $\Delta A_{av}$  不同,  $\Delta A_{av} = \Delta At/T$  在整个时间域上变化, 由于转换到频域的积分间隔不同而生成了草。但我们可以看出正是由于图 4(a) 的小脉冲的存在, 造成了  $\Delta t$  的变化, 也就有了  $\Delta A_{av}$ , 从而生成了草。而这些小脉冲正是调制信息的结果! 所以, 频谱草还是由于调制信息产生的。这一结论还可以从下面的分析看出。

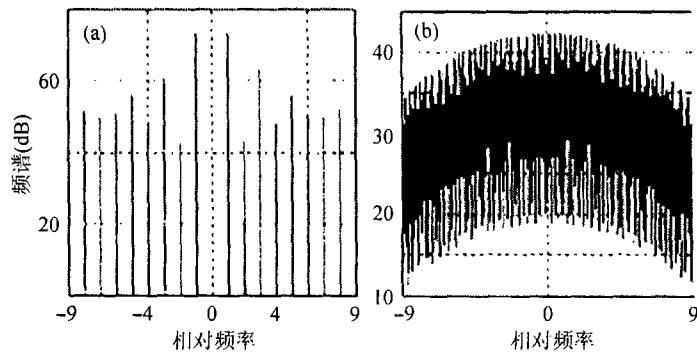


图 5  $F_a(\omega)$  和  $F_b(\omega)$  仿真结果

如果把图 5(a) 和图 5(b) 合并, 它就是我们得到的 VMSK 的频谱图 (图 6)。所以, VMSK 调制虽然含有的频率  $f_1$  和  $f_2$  非常接近, 但, 在两个频谱的转换点上, 会出现很宽的频谱。在传输要保持调制信息, 这些宽频谱必须保留!

我们还可以从另外一个角度来分析 VMSK 的频谱, 也可以得到同样的结果。

如果一个系统能够传输随机比特, 则它肯定能传输特殊比特。所以, 假如我们要传送 '101010...10' 的周期码。根据 VMSK 的编码特点, 它的波形也肯定是一个周期信号, 编码后的 VMSK 波形基本成分是图 7, 其大的周期为  $T = 2t_b$ 。对它进行频谱分析 (4), (5) 式, 得到图 8 的结果。

$$f_{\text{VMSK}}(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k e^{jk\omega t} = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k e^{jk(2\pi/T)t} \quad (4)$$

$$a_k = \frac{1}{T} \int_T f(t) e^{-jk\omega t} dt = \frac{1}{T} \int_T f(t) e^{-jk(2\pi/T)t} dt \quad (5)$$

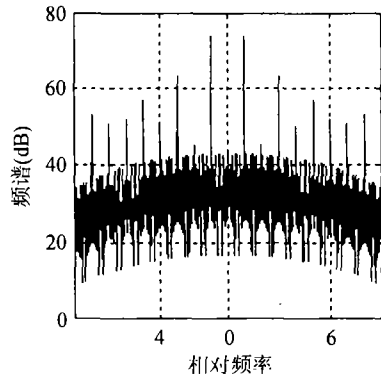


图 6 VMSK 的频谱

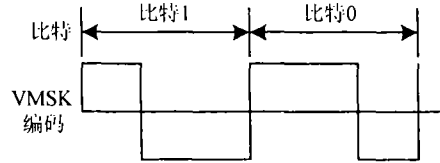


图 7 VMSK 编码信号

对于这样的频谱，用一个窄带滤波器只滤出一根频线，得到的只是一个频率的正弦波。而要得到原基本的波形（基波），则至少要 2-3 根谱线。那样的结果只能是一个宽带，根本不能用 H. R. Walker 所说的窄带滤波器。这也说明了一点：其实调制频谱是分布在很宽的频带上的。对于随机比特，就是  $T \rightarrow \infty$  的情况。这样每根谱线非常接近，就形成了图 3 形状的频谱。

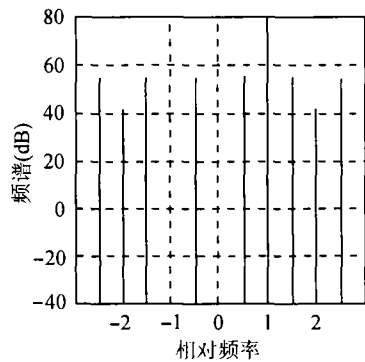


图 8 '1010...' VMSK 的频谱

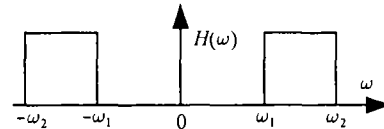


图 9 理想带通

### 4 VMSK 中的滤波器

上面我们分析了 VMSK 的频谱，指出调制信息是分布在很宽的频带上的，因此用一个窄带滤波器是不可能恢复信号的。在本节中，我们从滤波的角度来分析 VMSK 调制，也可以得到同样的结果。

为了得到甚窄的频谱，甚窄的滤波器是难免的。根据滤波器理论，我们都知道，对于一个理想带通的滤波器，它的时域冲击响应为一个 sinc 包络函数。而带宽与冲击响应的宽度是呈反比的。

$$H(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega_1 \leq |\omega| \leq \omega_2 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

它的冲击响应为  $h_B(t) = (2/\pi)[(1/t) \sin W_{FDB}t] \cos \omega_0 t$ ，其中  $\omega_0 = (\omega_2 + \omega_1)/2$ ，滤波器的半带宽  $W_{FDB} = (\omega_2 - \omega_1)/2$ 。由于  $W_{FDB}$  相对于  $f_b$  很小，所以包络展宽很大。对于比特的能量，就只有很小一部分通过滤波器。这可以从图 10 看出。如果时频关系满足奈奎斯特条件

(图中的 1 标注), 则滤波器能通过大部分的能量。但是如果滤波器太窄, 比特的频域宽度大于滤波器的带宽 (图中的 2 标注), 则只能通过一小部分的能量, 而这个能量从上一节中分析可知, 就是一个单频的正弦波。其中的调制信息却被滤除了。图 11 画出了比特周期与输出能量的关系, 如果比特周期比滤波器的频域带宽大 5 倍, 则只有 20% 能量输出, 更何况 VMSK 要达到 30bit/(s·Hz) 的利用率, 那样的结果会是什么样!

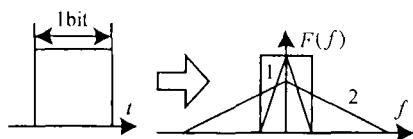


图 10 时频关系

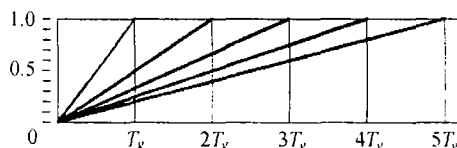


图 11 比特周期与输出能量的关系

我们仿真了一段 VMSK 的波形。先生成一段随机比特, 再用 VMSK 编码, 然后进行 FFT 变化, 截取一段我们所希望的频谱, 再进行 IFFT 转换到时域。得到了图 12 的波形。棱形标记的是原波形, 而星号的是滤波以后的波形。可以看出, 结果正像预期的那样, 得到的基本上是一个正弦波, 它把过零点都拉平了! 解调端根本不可能分辨出不同的比特信息。Walker 本人强

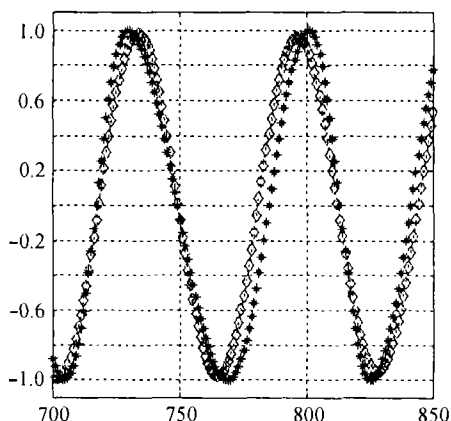


图 12 波形比较

调, 这个甚窄滤波器要求群时延要尽可能的小, 才能通过调制信息。但是, 我们的分析都是建立在理想的情况下的, 已经假设了群时延为 0。所以, 在我们的分析中, 并不存在群时延的问题。

还有说法是, VMSK 的调制只能在 SSB-SC 模式下的射频上才能仿真, 而在基带上是不行的。这又是一个非常奇怪的说法。我们都知道, 在数字通信中, 基带和载带的区别主要在于频谱的搬移上。没有可能在基带可行的方案, 会在载带上行不通, 反之亦然。而且从数学角度分析, 载带和基带也具有共性。

对于一个 VMSK 信号, 要频带窄, 它肯定工作在基波频率上, 因此, 可以表示为 ( $M = 13$ )

$$x(t) = \begin{cases} \sin \omega_1 t, & 0 \leq t < (6T_b/13) \\ \sin \omega_2(t), & (6T_b/13) \leq t < T \end{cases} \quad (6)$$

从数学角度得到它的 Hilbert 变化为

$$\hat{x}(t) = \begin{cases} \cos \omega_1 t, & 0 \leq t < (6T_b/13) \\ \cos \omega_2(t), & (6T_b/13) \leq t < T \end{cases} \quad (7)$$

因此, 对于单边带的 VMSK 信号为

$$\begin{aligned} m(t) &= x(t) \cos \omega_c t + \hat{x}(t) \sin \omega_c t \\ &= \begin{cases} \sin \omega_1 t \cos \omega_c t + \cos \omega_1 t \sin \omega_c t, & 0 \leq t < (6T_b/13) \\ \sin \omega_2 t \cos \omega_c t + \cos \omega_2 t \sin \omega_c t, & (6T_b/13) \leq t < T \end{cases} \\ &= \begin{cases} \sin(\omega_1 + \omega_c)t, & 0 \leq t < (6T_b/13) \\ \sin(\omega_2 + \omega_c)t, & (6T_b/13) \leq t < T \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

对于在射频上的 (8) 式, 它与在基带上的 (6) 式具有相同的形式, 如果让  $\omega_c = 0$ , 也就是 (6) 式的结果。所以, 并不存在只能在基带还是只能在载带分析的区别。

## 5 结 论

Walker 提出了一种很诱人的调制技术——VMSK, 按照他的分析可以得到  $30\text{bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$  的频带利用率。但是非常可惜的是, 它并不是一种可行的方案。现在, 对于 VMSK 调制的讨论非常激烈, 也有从香农定律等出发的理论上的分析<sup>[9]</sup>, 具体可以访问关于 VMSK 讨论的网站 <http://www.vmsk.org>。而本文从工程的角度分析了它的错误所在。指出 VMSK 只能是一个美丽的错觉。

## 参 考 文 献

- [1] H. R. Walker, VPSK and VMSK modulation transmit digital audio and video at  $15\text{bits}/\text{sec}/\text{Hz}$ , IEEE Transaction on Broadcasting, 1997, 43(1), 96–103.
- [2] H. R. Walker, The advantages of VPSK modulation for data transmission:  $10\text{bits}/\text{Hz}$  data compression without loss of signal power, WESCON/'95, Conference Record, San Francisco, Nov., 1995, 454–462.
- [3] H. R. Walker, B. Stryzak, M. L. Walker, Attain high bandwidth efficiency with VMSK modulation, Microwaves & RF, December 1997, <http://www.wsdmag.com/>.
- [4] J. C. Pliatsikas, C. S. Koukourlis, J. N. Sahalos, H. R. Walker, Improving VMSK modulation boosts wireless communications efficiencies, <http://www.castleen.com/alpha/vmsk1.html>.
- [5] K. H. Sayhood, Wu Lenan, Raise bandwidth efficiency with sine-wave-modulation VMSK MICROWAVES & RF, April 2001, 79–84, <http://www.wsdmag.com/>.
- [6] 徐友云, 宋文涛, 阮铭, 罗汉文, 甚高频带利用率的无线数字传输技术, 无线电通信技术, 1999, 25(5), 51–53.
- [7] 徐友云, 阮铭, 宋文涛, 罗汉文, 用于无线数字传输的双相编码调制, 上海交通大学学报, 2000, 34(2), 250–253.
- [8] M. K. Simon, S. Million, The power spectrum of unbalanced NRZ and biphase signals in the presence of data asymmetry NASA code 315-90-41-13-05, <http://tmo.jpl.nasa.gov>.
- [9] P. Karn The VMSK delusion, <http://people.qualcomm.com/karn/papers/vmsk>.

## THE VMSK MODULATION DELUSION

Chen Xiaoyi    Yao Qingdong    Liu Xiaocheng

(Dept. of Info. Sci and Electron Eng., Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract** H. R. Walker presented a high spectral efficiency modulation (VMSK). It can reach  $30\text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$  simply without loss of SNR in his analysis. There are papers introduce this technology in China too. But, through deeply analysis based on the engineering point, a very regrettable conclusion is obtained, i.e, this technology is a beautiful rainbow!

**Key words** VMSK, SSB-SC, Digital filter, Modulation

陈晓毅: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为数字通信, 软件无线电等。  
姚庆栋: 男, 1932 年生, 教授, 主要从事于图像处理, 数字通信, 芯片设计等。  
刘小成: 男, 1974 年生, 硕士生, 研究方向为无线网络, 信道编码等。