

doi: 10.3969/j.issn.1007-2861.2010.04.001

# 甚小线性调频键控调制波形的正弦基拟合优化

贾东立<sup>1,2</sup>, 郑国莘<sup>1</sup>, 张立<sup>1</sup>, 朱亚洲<sup>1</sup>

(1. 上海大学 特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072;  
2. 河北工程大学 信息与电气工程学院, 河北 邯郸 056038)

**摘要:** 甚小线性调频键控(very minimum chirp keying, VMCK)是一种高效的超窄带调制技术,具有窄带宽占用、强边带抑制、数据传输效率高等优点.但是,从VMCK的表达式不能得出其频谱结构的解析解,难以对信号进行进一步分析和优化.基于数值拟合原理,提出一种基于正弦基拟合分解的VMCK优化方案.理论分析和仿真结果表明,该方案可成功去除VMCK谐波线谱,得到带宽更窄、边带抑制更强的VMCK波形,信号的解调性能也可以得到进一步增强.

**关键词:** 甚小线性调频键控;正弦基拟合;波形优化

中图分类号: TN 911.7

文献标志码: A

文章编号: 1007-2861(2010)04-0331-05

## Optimization of Very Minimum Chirp Keying Modulation Waveforms Based on Sinusoidal Basis Fitting

JIA Dong-li<sup>1,2</sup>, ZHENG Guo-xin<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>, ZHU Ya-zhou<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China;  
2. School of Information and Electronic Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056002, Hebei, China)

**Abstract:** Very minimum chirp keying (VMCK) is a novel ultra narrow band modulation method with the advantages of narrow band occupancy, intensive sideband suppression, and high transmission efficiency. However, since an analytical solution of the VMCK spectrum cannot be obtained directly, further optimization is limited. This paper presents a VMCK modulation optimization scheme based on sinusoidal basis fitting. The theoretical analysis and simulation show that the proposed scheme can successfully remove harmonic spectral lines and obtain an optimized VMCK waveform with narrower bandwidth and lower sidebands, and good demodulation performance.

**Key words:** very minimum chirp keying (VMCK); sinusoidal basis fitting; waveform optimization

随着新型通信技术的日益涌现,无线频谱资源日益紧张,因此,设计合适的调制方案,并使其调制信号占用尽可能窄的带宽,以有限的频带传输尽可能多的调制信号已成为通信界研究人员长期追求的

目标<sup>[1-3]</sup>. Walker<sup>[2]</sup>率先研究了甚小频移键控(very minimum shift keying, VMSK)超窄带调制方案,为高效通信开拓了一条新的研究思路.李小平等<sup>[3]</sup>提出了一种基于功率谱解析优化的甚小波形差键控

收稿日期:2009-07-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60872021);上海市重点学科建设资助项目(S30108);上海市科委重点实验室资助项目(08DZ2231100)

通信作者:郑国莘(1959~),男,教授,博士生导师,研究方向为通信信号处理、限定空间通信. E-mail: gxzheng@staff.shu.edu.cn

(very minimum waveform difference keying, VWDK), 由于该方法去除了谐波线谱, 其传输带宽进一步变窄, 频率利用率进一步增强.

作为通信系统的关键技术之一, 调制方案的好坏直接影响着通信系统的信息传输效率和通信质量. 一个好的调制信号一般应具有以下特征: 尽可能小的占用带宽、强的边带抑制水平、较高的信息传输效率和解码可靠性. 甚小线性调频键控 (very minimum chirp keying, VMCK) 调制技术正是基于这一要求设计的一种超窄带调制方案. 由于采用单周期线性调频, 其 0 和 1 信息比特具有尽可能小的差异形式, 频谱能量集中在载频附近, 因此, 其信号带宽较窄, 并具有较高的传输效率. 同时, 其参数可控, 信号波形可在解调性能和频带利用率间进行平衡<sup>[4-6]</sup>.

VMCK 调制虽然具有优良的性能, 但由于从其表达式不能得出功率谱结构的解析解, 导致难以对其进行进一步分析和优化. 本研究从数值拟合原理出发, 提出一种基于正弦基拟合分解的 VMCK 波形优化方案. 仿真分析表明, 该方案可以成功去除 VMCK 谐波线谱, 得到带宽更窄、边带抑制更强的 VMCK 波形.

## 1 VMCK 调制

作为一种新型的调制方案, VMCK 具有带宽利用率高、解调性能良好等特点. 在每个比特周期内, 调频信息沿上升和下降两个相反方向变化, 并分别代表数据 0 和数据 1. 其波形生成公式如下:

$$s_0(t) = (1 - \alpha + 2\alpha f_s t) \sin\{2\pi f_s [1 - \alpha + \alpha f_s t] t\}, \quad 0 < \alpha \leq 1, 0 < t \leq 1/f_s, \quad (1)$$

$$s_1(t) = (1 + \alpha - 2\alpha f_s t) \sin\{2\pi f_s [1 + \alpha - \alpha f_s t] t\}, \quad 0 < \alpha \leq 1, 0 < t \leq 1/f_s, \quad (2)$$

式中,  $s_0(t)$  和  $s_1(t)$  分别代表数据 0 和数据 1 的信号;  $f_s$  为基波中心频率, 同时也代表了数据传输速率;  $\alpha$  为调制因子, 控制  $s_0(t)$  和  $s_1(t)$  之间的相关性, 当  $\alpha = 0.696$  时, 信号  $s_0(t)$  和  $s_1(t)$  正交.  $\alpha$  同时影响着信号占用带宽和解调性能,  $\alpha$  越小, 信号占用带宽越窄, 频谱能量越集中, 但解调性能下降, 抗干扰能力降低. 图 1 为当  $\alpha = 0.696$  和  $\alpha = 0.400$  时的 VMCK 波形, 图 2 为 1 000 个随机二进制数据 50 倍采样率下相应的快速傅里叶变换 (fast Fourier transforms, FFT) 功率谱估计图.

从图 1 可以看出, 当  $\alpha = 0.696$  时, 正交的  $s_0(t)$  和  $s_1(t)$  的波形差异明显大于  $\alpha = 0.400$  时的情形, 所以其解调性能更好些. 从图 2 可以看出, 当  $\alpha = 0.400$

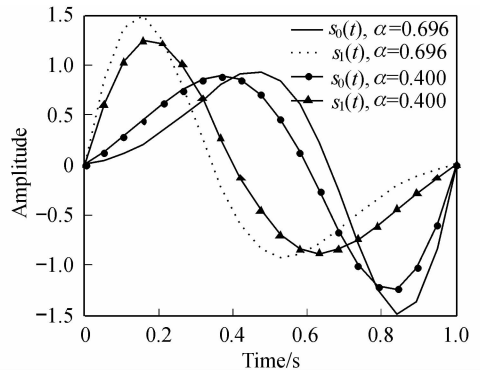


图 1 VMCK 波形

Fig. 1 VMCK waveforms

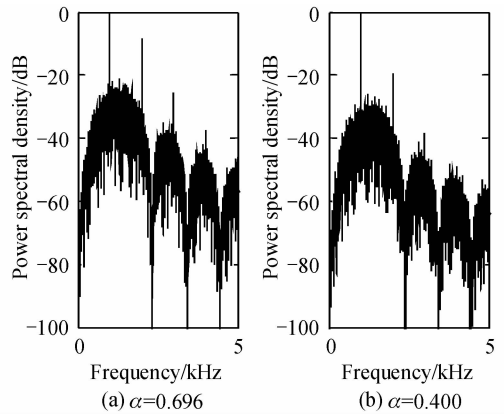


图 2 VMCK 信号的功率谱估计

Fig. 2 Power spectrum of VMCK signal

时的频谱能量更集中一些, 且边带抑制性更好. 因此, 通过选择合适的  $\alpha$  值, 可以在信号解调性能和频带利用率间进行平衡.

从图 2 还可以看出, 除主频外, 还有多次谐波所形成的线谱成分, 而这些谐波线谱严重影响边带抑制水平. 例如, 当  $\alpha = 0.696$  波形正交时, 如果去除第二根谐波线谱, 边带抑制可以达到 20 dB 以下.

下面将研究如何去除 VMCK 波形的谐波线谱, 并分析其解调性能的变化.

## 2 基于正弦基拟合的 VMCK 波形优化

### 2.1 VMCK 序列波形表示

设发射信号为一独立的二进制序列, 任一码元发射持续时间为  $T_s$ , 序列中信号  $s_0(t)$  和  $s_1(t)$  出现的概率分别为  $P$  和  $1 - P$ , 对序列的截取时间为

$$T = (2N + 1)T_s, \quad (3)$$

则序列  $s_T(t)$  可表示为

$$s_T(t) = \sum_{n=-N}^N s_n(t), \quad (4)$$

式中,

$$s_n(t) = \begin{cases} s_0(t - nT_s), & \text{以概率 } P, \\ s_1(t - nT_s), & \text{以概率 } 1 - P, \end{cases} \quad (5)$$

其功率谱密度为

$$P_s(w) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{E[|s_T(w)|^2]}{(2N+1)T_s}. \quad (6)$$

截短信号  $s_T(t)$  可看成由一个稳态波  $v_T(t)$  和一个交变波  $u_T(t)$  构成,其中稳态波为

$$v_T(t) = \sum_{n=-N}^N [Ps_0(t - nT_s) + (1 - P)s_1(t - nT_s)], \quad (7)$$

交变波为

$$u_T = s_T(t) - v_T(t). \quad (8)$$

稳态波  $v_T(t)$  构成了序列中的周期成分,是功率谱谐波线谱形成的主要因素<sup>[7]</sup>. 但是,由于 VMCK 调制信号表达式中包含  $\sin(at^2 + bt + c)$  项,对谐波的分离不能得出解析解,所以难以由公式直接进行波形优化.

本研究基于数值分析中的正弦基拟合原理,首先,对 VMCK 调制信号进行拟合,通过拟合函数找出 VMCK 的谐波线谱成分;然后,对 VMCK 调制进行相应优化,取得了较好的优化效果.

### 2.2 基于正弦基的 VMCK 调制信号拟合

波形拟合在信号处理中具有重要的作用<sup>[8-10]</sup>. 按照傅里叶分析理论,任何曲线都可看成是由各种谐波组合而成,曲线愈复杂,谐波的次数越高. 一般地,曲线可表示为如下形式<sup>[11]</sup>:

$$y = a_0 + a_1 \sin \alpha_1 + a_2 \sin \alpha_2 + \dots + a_n \sin \alpha_n, \quad (9)$$

式中,谐波项数  $n$  根据曲线复杂程度而定.

考察 VMCK 波形的特征,发现在其单周期内没有直流成分<sup>[6]</sup>,同时由于正交基拟合具有简洁的表达式,因此,可将拟合函数简化为

$$y(t) = a_1 \sin(\pi t) + a_2 \sin(2\pi t) + \dots + a_n \sin(n\pi t). \quad (10)$$

虽然在理论上,拟合的阶数越高,拟合效果越好,但经过实验,取 9 阶拟合时已经能满足优化设计要求. 对  $\alpha = 0.696$  波形正交时的 VMCK 信号进行 9 阶拟合,其拟合结果如下:

$$\begin{aligned} s_0(t) = & 0.2624 \sin(\pi t) + 0.7164 \sin(2\pi t) - \\ & 0.7125 \sin(3\pi t) + 0.2695 \sin(4\pi t) - \\ & 0.1023 \sin(5\pi t) + 0.03713 \sin(6\pi t) - \\ & 0.02048 \sin(7\pi t) + 0.009476 \sin(8\pi t) - \\ & 0.00716 \sin(9\pi t), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} s_1(t) = & -0.2624 \sin(\pi t) + 0.7164 \sin(2\pi t) + \\ & 0.7125 \sin(3\pi t) + 0.2695 \sin(4\pi t) + \\ & 0.1023 \sin(5\pi t) + 0.03713 \sin(6\pi t) + \\ & 0.02048 \sin(7\pi t) + 0.009476 \sin(8\pi t) + \\ & 0.00716 \sin(9\pi t). \end{aligned} \quad (12)$$

令  $0 \leq t \leq 1$ , 作 VMCK 单周期拟合,其波形如图 3 所示. 可以看出,拟合函数几乎完美地再现了原始 VMCK 波形.

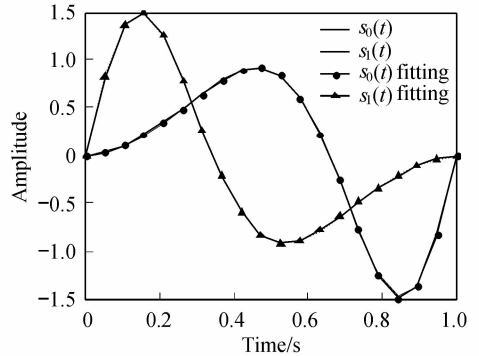


图3 正交 VMCK 信号的 9 阶拟合

Fig.3 9-order fitting of orthogonal VMCK signal

### 2.3 VMCK 调制信号优化

考虑到 VMCK 谐波线谱主要由序列截短信号  $s_T(t)$  的稳态波  $v_T(t)$  构成. 由式(7),并假设当序列足够长时,信号 0 和信号 1 出现的概率相等,即  $P = 1/2$ ,则拟合信号的稳态波可近似为

$$\begin{aligned} v_T(t) = & \sum_{n=-N}^N [Ps_0(t - nT_s) + (1 - P)s_1(t - nT_s)] = \\ & 0.7164 \sin(2\pi t) + 0.2695 \sin(4\pi t) + \\ & 0.03713 \sin(6\pi t) + 0.009476 \sin(8\pi t), \end{aligned} \quad (13)$$

式中,  $0.7164 \sin(2\pi t)$  项为基波,  $0.2695 \sin(4\pi t)$ ,  $0.03713 \sin(6\pi t)$  和  $0.009476 \sin(8\pi t)$  项分别对应二次、三次和四次谐波线谱.

式(1)和(2)分别减去稳态波  $v_T(t)$  在式(13)中谐波线谱的对应项,即可得到 VMCK 去谐波线谱的优化函数. 以  $\alpha = 0.696$  时正交状态下的 VMCK 去谐波线谱拟合优化函数为例,可得

$$\begin{aligned} g_0(t) = & (1 - \alpha + 2\alpha f_s t) \sin\{2\pi f_s [1 - \alpha + \alpha f_s t]t\} - \\ & 0.2695 \sin(4\pi f_s t) - 0.03713 \sin(6\pi f_s t) - \\ & 0.009476 \sin(8\pi f_s t), \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} g_1(t) = & (1 + \alpha - 2\alpha f_s t) \sin\{2\pi f_s [1 + \alpha - \alpha f_s t]t\} - \\ & 0.2695 \sin(4\pi f_s t) - 0.03713 \sin(6\pi f_s t) - \\ & 0.009476 \sin(8\pi f_s t). \end{aligned} \quad (15)$$

同理可得,当  $\alpha = 0.400$  时的 VMCK 去谐波拟合优化

函数为

$$g_0(t) = (1 - \alpha + 2\alpha f_s t) \sin\{2\pi f_s [1 - \alpha + \alpha f_s t]t\} - 0.09526\sin(4\pi f_s t) - 0.01058\sin(6\pi f_s t) - 0.002846\sin(8\pi f_s t), \quad (16)$$

$$g_1(t) = (1 + \alpha - 2\alpha f_s t) \sin\{2\pi f_s [1 + \alpha - \alpha f_s t]t\} - 0.09526\sin(4\pi f_s t) - 0.01058\sin(6\pi f_s t) - 0.002846\sin(8\pi f_s t). \quad (17)$$

其波形和 FFT 功率谱估计如图 4 和图 5 所示。

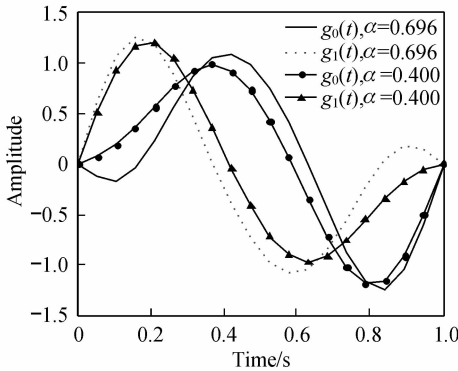


图 4 拟合优化的 VMCK 波形图

Fig. 4 Optimized VMCK waveforms

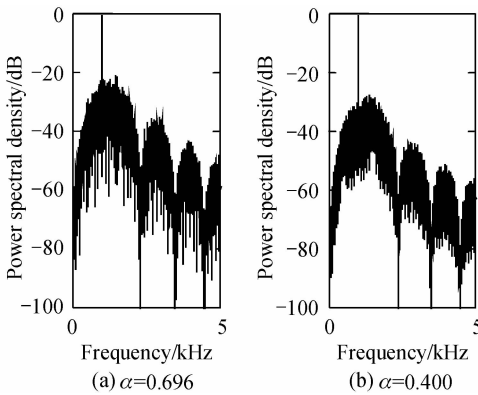


图 5 拟合优化 VMCK 信号的功率谱估计

Fig. 5 Power spectrum of optimized VMCK signal

从图 4 和图 5 可以看出,经过拟合优化后,功率谱中的谐波线谱部分已被成功去除,信号的边带抑制水平得到很大提高,并且由于去除了谐波项,信号的发射功率也得以降低。

### 3 解调性能分析

按照最佳解调原理,在白噪声信道中的系统误码率为

$$P_e(s_0, s_1) = 0.5 \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b(1-\rho)}{2n_0}}\right) = 0.5 \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b - \int_0^T s_0(t)s_1(t) dt}{2n_0}}\right), \quad (18)$$

式中,  $E_b$  为码元能量,  $n_0$  为噪声功率谱密度. 由式 (18) 可知,在  $E_b/n_0$  一定的情况下,系统误码率主要取决于 0 和 1 信号之间的相关性. VMCK 优化后的相关系数变化如表 1 所示。

表 1 VMCK 优化后相关系数的变化

Table 1 Changes of the optimized VMCK's correlation coefficient

$\alpha$	$\rho$	
	VMCK	VMCK 优化
0.696	0	-0.067 4
0.400	0.551 3	0.547 4

从表 1 可以看出,经过优化的 VMCK 信号的相关性进一步降低,例如,当  $\alpha = 0.696$  时的 VMCK 信号由正交变成负相关,这也预示其解调能力已得到进一步增强。

由式 (18) 得出的 VMCK 优化后的解调性能如表 2 和图 6 所示. 可以看出,经过优化后的系统误码率降低,解调性能得到进一步改善。

表 2 VMCK 优化后误码率的变化 (以 10 为底)

Table 2 Changes of the optimized VMCK's BER (based 10)

	$(E_b/n_0)/\text{dB}$						
	-10	5	0	5	10	15	20
VMCK, $\alpha = 0.696$	-0.424 9	-0.542 2	-0.799 5	-1.423 9	-3.106 4	-8.028 7	-23.118 1
VMCK, $\alpha = 0.400$	-0.380 8	-0.452 0	-0.599 5	-0.932 6	-1.767 6	-4.082 7	-10.977 7
VMCK 优化, $\alpha = 0.696$	-0.429 5	-0.551 9	-0.821 7	-1.480 3	-3.265 0	-8.504 9	-24.595 5
VMCK 优化, $\alpha = 0.400$	-0.381 2	-0.452 7	-0.601 1	-0.936 4	-1.777 5	-4.111 2	-11.064 1

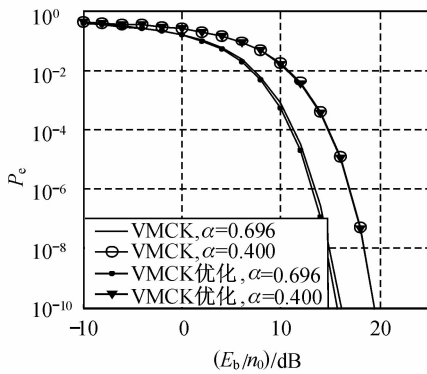


图6 VMCK优化后解调性能对比

Fig. 6 Performance comparison between VMCK and optimized VMCK

## 4 结束语

本研究提出了一种基于正弦基拟合的VMCK调制信号优化方法。由于去除了信号中的相关谐波谱成分,进一步抑制了VMCK的功率谱边带,使VMCK信号更适合于窄带传输环境。同时,由于信号的相关性降低,信号的解调性能也得到了进一步增强。

## 参考文献:

- [1] Federal Communications Commission. Spectrum policy task force report [R]. Tech Rep 02-155, 2002.
- [2] WALKER H R. VPSK and VMSK modulation transmit digital audio and video at 15 bits/sec/Hz [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1997, 3(1):96-103.

- [3] 李小平,吴乐南. VWDK调制的波形优化[J]. 电子与信息学报,2005,27(11):1714-1716.
- [4] ZHENG G X, FENG J Z, JIA M H. Very minimum chirp keying as a novel ultra narrow band communication scheme [C] // IEEE International Conference on Information, Communications & Signal Processing. 2007:1-3.
- [5] ZHENG G X, YANG W Y. The orthogonal very minimum chirp keying (OVMCK) modulations with very high bandwidth efficiency [C] // IEEE International Symposium on Antennas and Propagation Society. 2008:1-4.
- [6] ZHENG G X, YANG W Y, HE H, et al. Non DC offset very minimum chirp keying modulation as a novel ultra narrow band communication scheme [C] // IET Conference on Wireless, Mobile and Sensor Networks. 2007:755-758.
- [7] 樊昌信. 通信原理教程[M]. 2版. 北京:电子工业出版社,2008:96-102.
- [8] 鲍坤超,陶海红,廖桂生. 基于多项式拟合的非线性调频波形设计[J]. 信号处理,2008,24(2):189-191.
- [9] 齐国清,吕健. 正弦曲线拟合若干问题探讨[J]. 计算机工程与设计,2008,29(14):3677-3680.
- [10] 许化龙,袁晓峰,陈淑红. 正弦信号波形参数拟合求解的混合优化算法[J]. 电子测量与仪器学报,2004,18(4):1-5.
- [11] 乐美龙. 基于正交正弦基的数值拟合方法[J]. 上海交通大学学报,2001,35(4):522-526.

(编辑:赵宇)