

文章编号: 1001 - 893X(2012)04 - 0456 - 05

时相调制的频分多址接入性能分析*

邓 兵¹, 王 旭¹, 王红星¹, 毛忠阳¹, 李相辉²

(1. 海军航空工程学院 电子信息工程系, 山东 烟台 264001; 2. 解放军 71315 部队, 河南 商丘 476000)

摘 要:依据时相调制信号的相关系数分析了其频分多址接入性能, 导出了用户间载频差与相关系数的解析关系表达式, 可以发现: 由于其调制信息包含在很宽的边带谱内, 因此, 时相调制的频分多址接入需要较宽的信道划分, 且多用户间的互扰效果会随着载波频率差而起伏变化, 不过, 总的趋势是随着载频差的增大而减弱。分析结果为时相调制的频分多址方案设计提供了理论基础。

关键词:时相调制; 频分多址; 相位突变; 超窄带; 相关解调

中图分类号: TN911 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.04.007

Performance Analysis of Frequency - Division Multiple Access for Time - Phase Modulation

DENG Bing¹, WANG Xu¹, WANG Hong-xing¹, MAO Zhong-yang¹, LI Xiang-hui²

(1. Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China; 2. Unit 71315 of PLA, Shangqiu 476000, China)

Abstract: The performance of frequency - division multiple access (FDMA) is analysed for time - phase modulation based on the correlation coefficient. The analytic formula, which shows the relationship between the correlation coefficient and the difference of carrier frequency, is obtained. It can be found that wider band is necessary for FDMA of time - phase modulation by reason of the modulated information consisted in the very wide sideband. Moreover, the influence between multi - user will fluctuate versus the difference of carrier frequency, which diminishes as a whole when the difference of carrier frequency increases. The analysis results provide the theoretic base for FDMA scheme design.

Key words: time - phase modulation; frequency - division multiple access; phase jump; ultra - narrow band; correlation demodulation

1 引 言

在实际的频带传输系统中, 由于信道的频率资源有限, 因而要求有效地利用信道频带, 尽量提高信道的频带利用率。上世纪 70 年代以来, 随着卫星通信和移动通信的发展, 相继出现了最小频移键控

(MSK)、正弦频移键控(SFSK)、平滑调频(TFM)、预调制高斯滤波的最小频移键控(GMSK)、无码间串扰和相位抖动的交错四相相移键控(LJF - QPSK 或 Feher QPSK)以及多进制的振幅和相位联合调制(MQAM)等调制方式, 但是信息传输的带宽效率却仍然不高, 移动通信甚至达不到 $4 \text{ bit/s} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。为了

* 收稿日期: 2011 - 11 - 04; 修回日期: 2012 - 02 - 17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60902054); 中国博士后科学基金资助项目(201003758, 20090460114); 山东省“泰山学者”建设工程专项经费项目

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 60902054); China Postdoctoral Science Foundation (No. 201003758, 20090460114); Project Supported by “Taishan Scholars” Special Foundation of Shandong Province

缓解频谱资源的拥挤问题,一种称之为超窄带 (UNB) 的新型数字调制技术正在受到越来越多的关注。UNB 调制技术最早由美国的 H. R. Walker 提出^[1]。围绕该项技术产生了多种调制方式^[2-9],不过就其本质均属于相位突变调制。相位突变调制是利用矩形脉冲快速的下降或上升边缘特性进行相位调制的一种载波调制技术。将离散时间与相位突变相结合就得到了时相调制 (TPM)^[10]。

有关 TPM 的研究目前主要集中在单路调制理论^[10-13],而当几个用户使用相同的物理传输信道进行通信时,就需要通过多址接入方法来将各用户的信息区分开,而有关 TPM 多址接入的研究尚未见有公开文献。目前存在 3 种基本的多址接入方法,即频分多址、时分多址、码分多址。既然 TPM 信号具有很宽的连续边带谱,因此,本文以频分多址为对象,通过分析不同载波频率的多用户信号相关性来考察 TPM 信号边带谱对相邻用户的影响情况,为进一步设计 TPM 的高效多址接入方案奠定基础。

2 理论分析

不失一般性,可将二进制的 TPM 信号定义为

$$s(t) = \begin{cases} s_0(t), & \text{发送 0 码} \\ s_1(t), & \text{发送 1 码} \end{cases}, 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

式中, $s_0(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta_1)$, $0 \leq t \leq T$,

$$s_1(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t + \theta_1), & 0 \leq t \leq \tau \\ A \cos(2\pi f_c t + \theta_2), & \tau < t \leq T \end{cases}$$

f_c 表示载波频率, τ 表示一个码元周期内的相位突变时刻。图 1 为码元序列 [1 1 0 1 0] 的 TPM 信号波形, $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = \pi$, 码元传输速率为 1.5 Mbit/s, 载波频率为 30 MHz, 调制码元突变时刻为码元周期的 19/20。

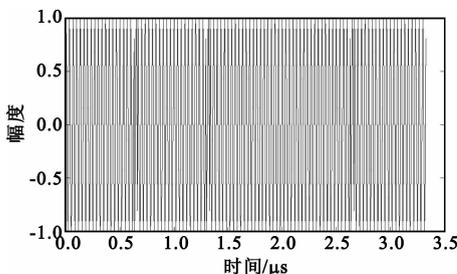


图 1 TPM 信号波形

Fig.1 TPM signal wave

假定两个用户其他调制参数相同,只是分别采

用不同的载波频率 f_{c1} 和 f_{c2} ($f_{c1} > f_{c2}$), 那么不妨用相关系数来考察两用户间的互扰。根据传号和空号,可以分为 3 种情况,即两用户同为空号、两用户同为传号以及两用户互为空号和传号。

2.1 两用户同为空号

此时相关系数为

$$\begin{aligned} \rho_{00} &= \int_0^T s_{10}(t) s_{20}(t) dt = \\ &= \int_0^T A \cos(2\pi f_{c1} t + \theta_1) A \cos(2\pi f_{c2} t + \theta_1) dt = \\ &= \frac{A^2}{2} \int_0^T [\cos(2\pi f_{c1} t + 2\pi f_{c2} t + 2\theta_1) + \cos(2\pi f_{c1} t - 2\pi f_{c2} t)] dt = \\ &= \frac{A^2}{2} \int_0^T [\cos(2\pi f_{c1} t + 2\pi f_{c2} t + 2\theta_1) + \cos(2\pi \Delta f_c t)] dt = \\ &= \frac{A^2}{2} \int_0^T [\cos(2\pi(2f_{c2} + \Delta f_c)t + 2\theta_1) + \cos(2\pi \Delta f_c t)] dt \quad (2) \end{aligned}$$

式中, $s_{10}(t)$ 、 $s_{20}(t)$ 分别表示用户 1 和用户 2 发“0”码的信号波形, $\Delta f_c = f_{c1} - f_{c2}$, 显然只要 $|\Delta f_c|$ 足够大, 即 f_{c1} 和 f_{c2} 间隔足够, 则 ρ_{00} 约等于 0。

既然

$$\begin{aligned} \int_0^T s_{10}(t) s_{10}(t) dt &= \int_0^T A \cos(2\pi f_{c1} t + \theta_1) A \cos(2\pi f_{c1} t + \theta_1) dt = \\ &= \frac{A^2}{2} \int_0^T [\cos(4\pi f_{c1} t + 2\theta_1) + 1] dt \leq \\ &= \frac{A^2 T}{2} + \frac{A^2}{2} \int_0^{\tilde{T}/2} \cos(4\pi f_{c1} t - \pi/2) dt \quad (3) \end{aligned}$$

其中 $\tilde{T} = 1/2f_{c1}$, 且

$$\frac{A^2}{2} \int_0^{\tilde{T}/2} \cos(4\pi f_{c1} t - \pi/2) dt = \frac{A^2}{2} \cdot \frac{1}{2\pi f_{c1}} \quad (4)$$

所以, 有:

$$\int_0^T s_{10}(t) s_{10}(t) dt \leq \frac{A^2 T}{2} + \frac{A^2}{2} \cdot \frac{1}{2\pi f_{c1}} \approx \frac{A^2 T}{2} \quad (5)$$

同理, $\int_0^T s_{11}(t) s_{11}(t) dt \leq \frac{A^2 T}{2} + \frac{A^2}{2} \cdot \frac{1}{2\pi f_{c1}} \approx \frac{A^2 T}{2}$, $s_{11}(t)$ 表示用户 1 发“1”码的信号波形。

那么归一化后, 设定相关系数门限为 $\mu > 0$ 。若需要两用户互扰小, 则须保证 $|\rho_{00}| / \frac{A^2 T}{2} < \mu$ 。既然

$$\begin{aligned} \frac{A^2}{2} \int_0^T \cos(2\pi \Delta f_c t) dt &\leq \frac{A^2}{2\pi \Delta f_c}, \text{ 根据式 (2), 则需} \\ |\Delta f_c| &> \frac{1}{\pi \mu T} \end{aligned}$$

2.2 两用户同为传号

此时相关系数为

$$\rho_{11} = \int_0^T s_{11}(t) s_{21}(t) dt =$$

$$\int_0^\tau A\cos(2\pi f_{c1}t + \theta_1)A\cos(2\pi f_{c2}t + \theta_1)dt + \int_\tau^T A\cos(2\pi f_{c1}t + \theta_2)A\cos(2\pi f_{c2}t + \theta_2)dt = \frac{A^2}{2} \int_0^\tau [\cos(2\pi f_{c1}t + 2\pi f_{c2}t + 2\theta_1) + \cos(2\pi\Delta f_c t)]dt + \frac{A^2}{2} \int_\tau^T [\cos(2\pi f_{c1}t + 2\pi f_{c2}t + 2\theta_2) + \cos(2\pi\Delta f_c t)]dt \quad (6)$$

根据上小节的推导,可知这种情况下,需要两用户互扰小,则须保证 $|\Delta f_c| > \frac{2}{\pi\mu T}$ 。

2.3 两用户互为空号和传号

此时相关系数为

$$\rho = \rho_{10} = \rho_{01} = \int_0^T s_{10}(t)s_{21}(t)dt = \int_0^\tau A\cos(2\pi f_{c1}t + \theta_1)A\cos(2\pi f_{c2}t + \theta_1)dt + \int_\tau^T A\cos(2\pi f_{c1}t + \theta_1)A\cos(2\pi f_{c2}t + \theta_2)dt = \frac{A^2}{2} \left\{ \int_0^\tau [\cos(2\pi f_{c1}t + 2\pi f_{c2}t + 2\theta_1) + \cos(2\pi\Delta f_c t)]dt + \int_\tau^T [\cos(2\pi f_{c1}t + 2\pi f_{c2}t + \theta_1 + \theta_2) + \cos(2\pi\Delta f_c t + \theta_1 - \theta_2)]dt \right\} \quad (7)$$

可知这种情况下,需要两用户互扰小,则须保证

$$|\Delta f_c| > \frac{2}{\pi\mu T}$$

综上所述,如果设定相关系数门限为 $\mu > 0$,那么一般需要 $|\Delta f_c| > \frac{2}{\pi\mu T}$ 。另外,从上述推导也可以看出:相关系数是随着载波频率差而变化的,因此,多用户间干扰效果也会随着载波频率差而起伏变化,不过,总的趋势是随着 $|\Delta f_c|$ 的增大而减弱。

2.4 相关系数门限

实际上,时相调制的单用户空号波形和传号波形也并不是正交的,那么不妨利用单用户空号和传号波形的相关系数来定义多用户互扰的相关系数门限。单用户空号和传号波形的相关系数如下:

$$\rho_1 = \int_0^T s_{10}(t)s_{11}(t)dt = \int_0^\tau A\cos(2\pi f_{c1}t + \theta_1)A\cos(2\pi f_{c1}t + \theta_1)dt + \int_\tau^T A\cos(2\pi f_{c1}t + \theta_1)A\cos(2\pi f_{c1}t + \theta_2)dt = \frac{A^2}{2} \int_0^\tau [\cos(4\pi f_{c1}t + 2\theta_1) + 1]dt + \frac{A^2}{2} \int_\tau^T [\cos(4\pi f_{c2}t + \theta_1 + \theta_2) + \cos(\theta_1 - \theta_2)]dt \approx$$

$$\frac{A^2}{2} \int_0^\tau 1dt + \frac{A^2}{2} \int_\tau^T \cos(\theta_1 - \theta_2)dt \quad (8)$$

从上式可得:

$$\frac{A^2}{2} (2\tau - T) \leq \rho_1 \leq \frac{A^2}{2} T \quad (9)$$

不妨令 $\theta_1 - \theta_2 = \pi$,则归一化后得到:

$$\rho_1 \approx \frac{2\tau - T}{T} \quad (10)$$

因此,门限取值范围为 $(0, \frac{2T - 2\tau}{T})$ 。

3 仿真

假定 TPM 信号在 AWGN 信道中传输,则 TPM 接收信号是发送信号与随机噪声之和:

$$r(t) = s(t) + n(t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (11)$$

其中, $n(t)$ 为高斯白噪声。图 2 所示为 TPM 的相关接收器。

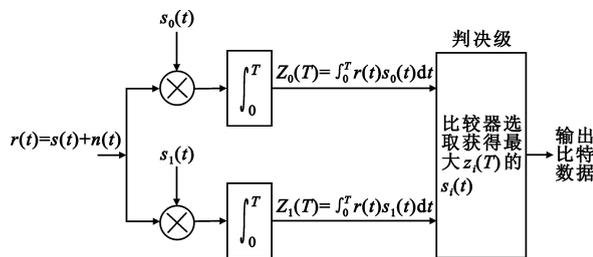


图 2 TPM 的相关接收器
Fig. 2 The correlation receiver for TPM

当采用频分多址接入时,给每个用户分配不同的载波频率,则某用户的接收信号为

$$r(t) = s(t) + n(t) + \sum_j r_j(t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (12)$$

其中, $r_j(t)$ 为其他用户的 TPM 信号。

通过 MATLAB 仿真实验平台,对两用户同时接入的相关检测进行了蒙特卡罗仿真,验证两用户间的相互干扰结果。仿真实验中,参数设置如下:比特率为 1.5 Mbit/s,采样频率为 300 MHz,信道为 AWGN 信道,码元突变时刻为码元周期的 19/20 倍,用户 1 载波频率为 30 MHz。

根据上述参数可以得到:

$$\frac{2T - 2\tau}{T} = \frac{2T(1 - 19/20)}{T} = 0.1 \quad (13)$$

取门限为最大值,即 $\mu = 0.1$,则

$$\frac{2}{\pi\mu T} = \frac{2 \times 1.5 \times 10^6}{\pi \times 0.1} \approx 9.55 \text{ MHz} \quad (14)$$

由此可知,两用户间互扰要小的话需要载频差不小于约 9.55 MHz。仿真结果如图 3 和图 4 所示,可见仿真结果较好地吻合了上述理论推导。

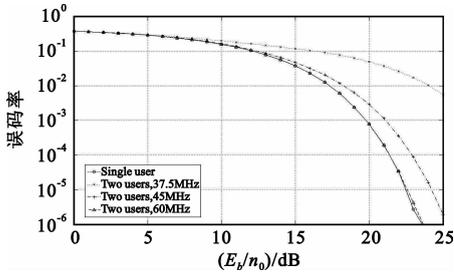


图 3 单用户及两用户同时工作时用户 1 的误码率曲线 (用户 2 的载波频率分别为 37.5 MHz、45 MHz、60 MHz)

Fig.3 BER of user 1 when user 1 works along or together with user 2 (the carrier frequency of user 2 is 37.5 MHz, 45 MHz, 60 MHz, respectively)

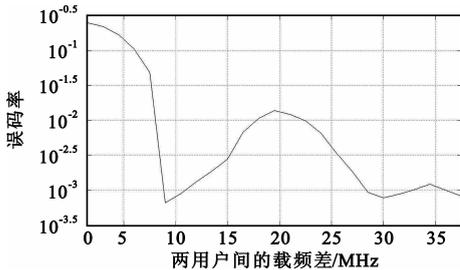


图 4 $E_b/n_0 = 20$ dB 时两用户同时工作时用户 1 的误码率

Fig.4 BER of user 1 working together with user 2 when $E_b/n_0 = 20$ dB

4 结 论

从上述理论分析和仿真可以看出:尽管 TPM 是一种超窄带调制技术,其功率谱在载波附近高度集中,其连续边带谱衰减接近 -60 dB,因此其对传统通信系统的干扰很小,可以利用很窄的信道间隙进行有效传输。但是由于 TPM 的调制信息包含在频带很宽的边带谱中,因此,TPM 自身的频分多址接入需要较宽的信道划分,其用户间的载频差须不小于 $\frac{2}{\pi T} \cdot \frac{T}{2T-2\tau} = \frac{1}{\pi(T-\tau)}$,且多用户间干扰效果会随着载波频率差而起伏变化,不过,总的趋势是随着载波频率差的增大而减弱。因此,在 TPM 的频分多址方案设计中,在用户载频比较接近的情况下,仍然可以通过选择合适的载频差来改善频分多址接入性能。

参考文献:

[1] Walker H R. VPSK and VMSK modulation transmit digital

audio and video at 15 bits/sec/Hz[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1997, 43(1): 96 - 103.

- [2] 吴乐南. 超窄带高速通信进展[J]. 自然科学进展, 2007, 17(11): 1467 - 1473.
- WU Le - nan. Evolution of Ultra narrow high speed communication[J]. Progress in Natural Science, 2007, 17(11): 1467 - 1473. (in Chinese)
- [3] 徐友云, 阮铭, 宋文涛, 等. 用于无线数字传输的双相编码调制[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(2): 250 - 253.
- XU You - yun, RUAN Ming, SONG Wen - tao, et al. Biphas coded modulation for wireless digital transmission [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, 34(2): 250 - 253. (in Chinese)
- [4] 胡剑凌, 徐盛, 陈健. 实现 20 比特/秒/赫兹的无线传输数字调制算法——VMSK/2[J]. 电子学报, 2002, 30(8): 1153 - 1155.
- HU Jian - ling, XU Sheng, CHEN Jian. VMSK/2 Modulation for Wireless Data Transmission at 20 Bits/Sec/Hz [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(8): 1153 - 1155. (in Chinese)
- [5] Walker H R. Ultra narrow band modulation[C]//Proceedings of IEEE Sarnoff Symposium on Advances in Wired and Wireless Communication. Princeton, New Jersey: IEEE, 2004, 19 - 22.
- [6] 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.
- LI Xiao - ping, WU Le - nan. On optimazation of VWDK modulated waveforms[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2005, 27(11): 1714 - 1716. (in Chinese)
- [7] 吴乐南, 张士凯. 统一的二元相位调制解调方法: 中国, 200610040767.2 [P]. 2006 - 06 - 01.
- WU Le - nan, ZHANG Shi - kai. An Unified Binary Phase Modulation and Demodulation method: China, 200610040767.2 [P]. 2006 - 06 - 01. (in Chinese)
- [8] Feng Man, Qi Chen - hao, Wu Le - nan. Analysis and Optimization of Power Spectrum on EBPSK Modulation in Throughput - efficient Wireless System[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2008, 24(2): 143 - 148.
- [9] LI Bin, ZHOU Zheng, ZOU Wei - xia. RPPK Modulation with High Data Rates [J]. Science in China (Information Sciences), 2010, 53(2): 344 - 354.
- [10] 王洪利. 时相调制技术研究[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2010.
- WANG Hong - li. Study on Time - phase Modulation Technology [D]. Yantai: Naval Aeronautical and Astronautical University, 2010. (in Chinese)
- [11] 王洪利, 王红星, 舒轶昊. 基于循环谱理论的时相调制信号分析[J]. 电讯技术, 2009, 49(3): 16 - 21.
- WANG Hong - li, WANG Hong - xing, SHU Yi - hao. Time - Phase Modulation Signal Analysis Based on Cyclic

Spectrum Correlation Technology [J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(3): 16-21. (in Chinese)

- [12] 王红星,王洪利,舒轶昊,等. 时相调制的循环相关匹配滤波技术研究[J]. 无线电通信技术, 2010, 36(1): 10-12,25.

WANG Hong-xing, WANG Hong-li, SHU Yi-hao, et al. Study on Cyclic Correlation Matched Filtering on Time-phase Modulation [J]. Radio Communications Technology, 2010, 36(1):10-12,25. (in Chinese)

- [13] 迟华山,王红星,赵鹏. 时相调制信号的S变换和反变换性能分析[J]. 电讯技术, 2011, 51(10):41-45.

CHI Hua-shan, WANG Hong-xing, ZHAO Peng. Performance analysis of S-transform and its inverse for Time-Phase modulation [J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(10): 41-45. (in Chinese)

作者简介:

邓兵(1975—),男,湖南衡阳人,2006年获博士学位,现为海军航空工程学院副教授、硕士生导师,IEEE会员,电子学会高级会员,主要研究方向是非平稳信号处理及其应用;

DENG Bing was born in Hengyang, Hunan Province, in 1975.

He received the Ph. D. degree in Communication and Information Systems from Beijing Institute of Technology in 2006. He is now an associate professor and instructor of graduate students, an IEEE member and also a senior member of Chinese Institute of Electronics. His research concerns nonstationary signal processing and its applications.

Email: dengbing@bit.edu.cn

王旭(1987—),男,天津人,2010年获学士学位,现为硕士生研究生,主要研究方向是非平稳信号处理;

WANG Xu was born in Tianjin, in 1987. He received the B.S. degree from Naval Aeronautical and Astronautical University in 2010. He is now a graduate student. His research concerns nonstationary signal processing.

王红星(1962—),男,河南商丘人,现为海军航空工程学院教授、博士生导师,主要研究方向是现代通信新技术、通信信号处理。

WANG Hong-xing was born in Shangqiu, Henan Province, in 1962. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns the new technology of modern communication and signal processing in communication.

《电讯技术》征稿的新要求

为了促进本刊的国际化进程,进一步扩大影响力,为广大科技人员搭建更高层次的学术研究和学术交流平台,现对来稿作如下几点新的要求:

(1)来稿中的图题、表题应给出对应的英文翻译;

(2)中文参考文献采用双语著录;

(3)属于基金项目的来稿应给出项目的英文翻译;

(4)提供作者简介的英文翻译,其中应包括作者的出生年、籍贯、何时获得已有学位、研究方向等内容,可参见IEEE系列刊物作者简介的翻译;

(5)欢迎作者将具有原创性的研究成果直接以全英文论文投稿,应注意语言流畅,专业术语准确,符合科技英语表达习惯,并附上中文标题、单位、摘要和关键词,以及中文作者简介;

(6)为了保证出版的及时性,作者不得在自校阶段对稿件作大幅修改,否则,将按新投稿件处理,编辑部保留追究由此造成的一切损失的权利。

更多信息请浏览本刊网站:www.teleonline.cn。

《电讯技术》编辑部