

文章编号:1001-893X(2010)05-0043-04

AWGN 信道中基于时频分布的超窄带解调算法^{*}

王红星¹,王洪利²,毛忠阳¹,王 阳³

(1. 海军航空工程学院 电子与信息工程系,山东 烟台 264001;

2. 海军航空工程学院 研究生管理大队,山东 烟台 264001;3. 解放军 94326 部队,济南 250023)

摘 要:针对脉冲位置相位翻转键控(Pulse Position Phase Reversal Keying, 3PRK)调制的解调问题,基于时频分析方法,对 3PRK 信号的伪魏格纳-威利(PWVD)分布特性进行了详细分析,建立了 3PRK 调制信号相位突变与 PWVD 分布幅度的关系模型,利用该模型提出了一种新的基于 PWVD 分布的 3PRK 调制解调算法,并对该解调算法性能进行了仿真分析。仿真结果验证了该算法的有效性。

关键词:超窄带解调;频带利用率;相位突变;3PRK 调制;PWVD 分布

中图分类号:TN911 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2010.05.009

An Ultra Narrow Bandwidth Demodulation Algorithm Based on Time-Frequency Distribution

WANG Hong-xing¹, WANG Hong-li², MAO Zhong-yang¹, WANG Yang³

(1. Department of Electronics and Information Engineering, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China; 2. Graduate Management Unit, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China; 3. Unit 94326 of PLA, Jinan 250023, China)

Abstract: To solve the problem of 3PRK(Pulse Position Phase Reversal Keying) demodulation, the property of PWVD distribution of 3PRK modulation signals is analysed based on time-frequency analysis method. The relation model between abrupt phase change and amplitude of PWVD distribution of 3PRK signals is proposed, and by using this model, a demodulation algorithm for 3PRK based on PWVD distribution is presented. The validity of the algorithm is proved by simulation result.

Key words: ultra narrow bandwidth(UNB) demodulation; bandwidth efficiency; abrupt phase change; 3PRK modulation; PWVD distribution

1 引 言

通信系统定义为信息的传输系统,通信的目的就是可靠和有效地传输信息。频带利用率(归一化为 1 Hz 带宽,每秒可传输的比特数)是衡量通信系统有效性的指标,也可以说是衡量无线通信技术先进性的关键指标,而无线频谱资源的宝贵尤显有效性

的重要。

美国电子工程师 Harold R. Walker 在 1985 年提出超窄带(Ultra Narrow Bandwidth, UNB)通信^[1]。据 Walker 发表的文献称,其频带利用率可达 30 bit/s·Hz⁻¹甚至更高^[2],而且不会像 Shannon 信道容量公式所预言的那样,发射信号所需的信噪比随着频带利用率的增大而迅速增加,只需要满足传统的二进制相移键控(BPSK)的信噪比要求即可。随

^{*} 收稿日期:2010-01-26;修回日期:2010-03-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60772056)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 60772056)

着对超窄带调制研究的深入, Walker 又提出了脉冲位置相位翻转键控(Pulse Position Phase Reversal Keying, 3PRK)^[3]、脉冲位置相移键控^[4](Pulse Position Phase Shift Keying, 3PSK)等一系列超窄带调制方式, 国内学者也针对超窄带调制的特性分别提出了类正弦 VMSK^[5]、甚小波形差键控调制(VWVK)^[6]以及扩展二元相移键控调制(EBPSK)^[7]等调制方式。但是由于超窄带调制信号占用带宽极窄, 如何正确解调该类调制信号成为超窄带调制可行与否的关键。

本文以超窄带调制方式中具有代表意义的 3PRK 调制方式为研究对象, 对其承载信息的相位突变特性进行了详细分析, 并利用非平稳信号分析方法, 建立了 3PRK 相位突变与 PWVD 分布特性的关系模型。基于该关系模型提出了一种高斯白噪声信道(AWGN)中基于 PWVD 分布的 3PRK 调制解调算法, 最后对该解调算法性能进行了分析, 并给出仿真分析结果。理论及仿真结果表明, 基于时频分布的超窄带解调算法为 3PRK 一类具有相位突变特性的超窄带调制提供了一种可行的解调方法, 为超窄带调制的可行性提供了参考。

2 3PRK 调制原理

3PRK 基带编码调制属于非归零的双向数字基带编码调制, 调制时通过输入信号脉冲的相位对基带编码进行调制。原理如下^[4]: 在基带编码时每个比特占用固定的时槽长度, 且在每个比特内有 1~2 个射频周期宽度的相位翻转, 翻转时刻由比特值决定。如果是比特“1”, 则在该比特起始点处出现相位翻转, 如果是比特“0”, 则不发生翻转, 并且, 比特“1”与比特“0”为等概传输。

3PRK 基带调制信号数学表达式如下:

$$s(t) = \sum_n (a_n \cdot q_1(t - nT) + (1 - a_n) \cdot q_0(t - nT)) \tag{1}$$

式中, a_n 是输入二进制比特流序列, $q_0(t)$ 、 $q_1(t)$ 分别是对应一个符号周期 T 发送的“0”、“1”基带波形:

$$\begin{aligned} q_0(t) &= A, 0 \leq t \leq T \\ q_1(t) &= \begin{cases} -A, & 0 \leq t \leq \tau \\ A, & \tau \leq t \leq T \end{cases} \end{aligned} \tag{2}$$

式中, A 是基带波形的幅度, τ 为码元“1”极性翻转持续时间。

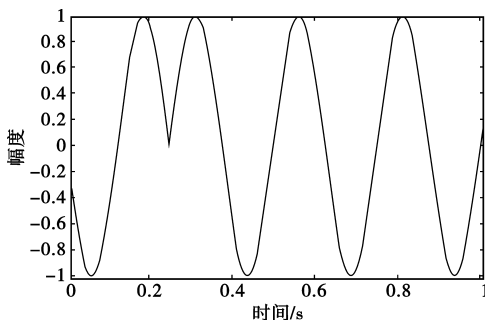
3PRK 调制信号数学表达式如下:

$$s(t) = \sum_n (a_n \cdot s_1(t - nT) + (1 - a_n) \cdot s_0(t - nT)) \tag{3}$$

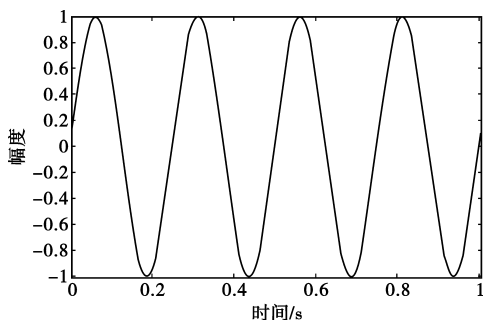
式中, $s_0(t)$ 、 $s_1(t)$ 分别是对应一个符号周期 T 发送的“0”、“1”波形。

$$\begin{aligned} s_0(t) &= A \sin 2\pi f_c t, 0 \leq t \leq T \\ s_1(t) &= \begin{cases} A \sin(2\pi f_c t + \pi), & 0 \leq t \leq \tau \\ A \sin 2\pi f_c t, & \tau \leq t \leq T \end{cases} \end{aligned} \tag{4}$$

式中, f_c 是载波频率, $f_c = N/T$; τ 为比特“1”时相位发生突变后载波持续时间; N 表示每个符号周期中有 N 个载波周期, 实际中一般取 $N \geq 10$ 。图 1 为 N 和 τ 分别取 4 和 $T/4$ 时, 3PRK 载波调制后的波形图。



(a) “1”比特信号波形



(b) “0”比特信号波形

图 1 3PRK 已调信号波形
Fig.1 3PRK modulated signal wave

3 基于时频分布的超窄带解调算法

研究表明, 实际应用的时频分布形式的幅度与信号的相位结构之间相互影响, 并且存在确定的关系, 可据此对相位的跳变时刻与数值进行检测^[7]。

由于 3PRK 调制最大的特征就是存在相位突变, 如果能够准确检测到相位突变的时刻, 则可以对 3PRK 接收信号进行正确的解调。因此, 可以根据文献^[7]中的方法建立 3PRK 的时频分布形式的幅度与信号相位结构之间的关系模型, 从而得到一种基

于时频分布形式的 3PRK 解调算法。

为准确得到 3PRK 信号的时频分布形式,首先给出 3PRK 信号的解析信号形式:

$$\begin{aligned} z(t) &= \sum_n (a_n \cdot \eta_1(t - nT) + \\ &\quad (1 - a_n) \cdot \eta_0(t - nT)) \quad (5) \\ \eta_0(t) &= Ae^{j(2\pi f_c t - \pi/2)}, \quad 0 \leq t \leq T \\ \eta_1(t) &= \begin{cases} Ae^{j(2\pi f_c t + \pi/2)}, & 0 \leq t \leq \tau \\ Ae^{j(2\pi f_c t - \pi/2)}, & \tau \leq t \leq T \end{cases} \end{aligned}$$

假设采用伪魏格纳 - 威利分布(PWVD)形式,使用矩形计算窗口对信号进行取样,矩形时域窗口的宽度为 T ,最终得到当信号的相位突变点位于时域计算窗口以外时,信号载波频率位置的时频分布是一个与时间 t 无关的常量:

$$\lim_{\omega \rightarrow \omega_c} D_{ss}(t, \omega) = A^2 T \quad (6)$$

当信号的相位突变点位于时域计算窗口内,并且矩形计算窗口的中心与相位突变点重合时,信号载波频率位置的时频分布也是一个与时间 t 无关的常量:

$$\lim_{\omega \rightarrow \omega_c} D_{ss}(t, \omega) = -A^2 T \quad (7)$$

而当计算窗口中心偏离相位突变点时,信号载波频率位置的时频分布为

$$\lim_{\omega \rightarrow \omega_c} D_{ss}(t, \omega) = A^2 |\tau| - A^2 (T - |\tau|) \quad (8)$$

式中, τ 表示偏离量。

由式(6)~(8)可知:在相位突变点附近,信号的 PWVD 分布幅度在载波频率处是一个与参数 $|\tau|$ 有关的折线。且随着时域计算窗口的滑动,在相位突变点位置附近,信号 PWVD 分布幅度的峰值向着相位突变点的方向连续减小,最终在该点处达到极小值。图 2 为含有两个相位突变点的 3PRK 时域波形及载波频率处 PWVD 分布的幅度。

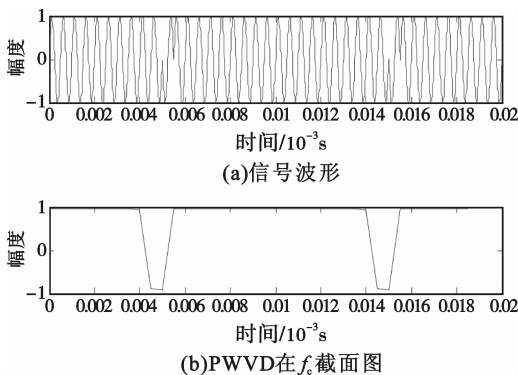


图 2 3PRK 信号波形图、PWVD 在 f_c 截面图
Fig.2 3PRK signal waveform and the diagram in f_c section of PWVD

由图 2 可知,根据比特周期开始处的 3PRK 接收信号的 PWVD 分布在载波处的幅度加以判决,可以解调出要恢复的有用信息,从而得到基于时频分布的 3PRK 解调算法流程:

- (1)将待接收到的 3PRK 信号 $x(n)$ 输入到一个有 m 个 1 阶延迟单元中。延迟单元个数一般为 3PRK 信号载波两个周期的采样点数,延迟单元每次向前可以移动一位也可以是几位,但是不要超过一个周期的采样点数,不然会有信息丢失;
- (2)将各个延迟单元的数据与相对应的权处理单元相乘后送入时频处理模块。权处理单元的作用相当于时频处理中的窗函数,可以在时频模块中实现;
- (3)数据送入时频模块以后进行 PWVD 时频分析;
- (4)由时频处理模块运算后的数据送入选谱模块选择得到 3PRK 信号相位信息到时频幅度信息的最佳映射;
- (5)将得到的最佳映射送入可控门限检测器检测,门限检测器检测时钟由同步信号提供,在每次码元起始时间进行检测。门限的选择必须以波形能量作为参考。

4 仿真分析

对载波频率 $f_c = 40$ kHz、占空比为 1:20、传输码率 $f_b = 2$ kHz 的 3PRK 调制接收信号,采用基于时频分布的解调算法,窗口宽度取为 21。对信噪比为 4~18 dB 的 3PRK 调制系统误码性能进行仿真,仿真结果如图 3 所示。

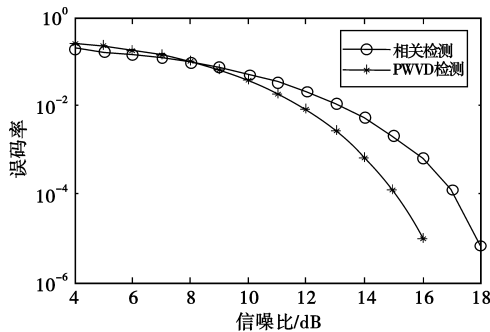


图 3 基于 PWVD 分布的 3PRK 调制解调算法性能分析
Fig.3 Performance of demodulated algorithm of 3PRK based on PWVD distribution

由图 3 可知,基于 PWVD 分布的 3PRK 调制解调算法使用了简单的时频分析方法,实现了 3PRK 调制信号的解调,且系统误码性能优于基于内积的传统的相关解调算法,从而证明了该解调算法的可行性和有

效性。同时,通过对比图3中两条曲线可以看出,当信噪比条件逐渐改善时,基于时频分布的3PRK解调算法对调制系统的性能提升逐渐显现,当误码性能为 10^{-5} 时,性能提升接近2 dB,因此,该基于时频分布的3PRK解调算法具有重要的实用价值。

5 结 论

本文以超窄带调制中具有代表意义的3PRK调制信号为研究对象,针对超窄带调制中的非平稳信号特征,研究了基于时频分布的超窄带调制解调算法。从非平稳信号分析方法入手,对3PRK信号的相位突变特性进行了PWVD分析,建立了3PRK信号相位突变与时频分布幅度的关系模型,基于该模型提出了一种基于PWVD分布的超窄带调制解调算法,并对该解调算法性能进行了仿真分析。仿真结果显示,基于PWVD分布的3PRK信号解调算法,其误码性能优于基于内积的相关检测方法。理论分析及仿真表明,基于时频分布的超窄带调制解调算法不仅为具有相位突变特性的超窄带调制信号提供了一种有效的解调方法,而且为该类调制信号提供了一种基于非平稳信号分析的通信信号处理思路。

参考文献:

- [1] Walker H R. High speed binary data communication system: US, 4742532 [P]. 1988.
 - [2] Walker H R. Attain high bandwidth efficiency using VMSK modulation [J]. Microwaves & RF, 1997, 36(12): 173.
 - [3] Walker H R. Digital modulation device in a system and method of using the same: US, 6445737 [P]. 2002.
 - [4] Walker H R. Ultra Narrow Band Modulation Textbook [EB/OL]. [2009-09-01]. <http://www.vmsk.Org>.
 - [5] Sayhood K H, Wu Lenan. Raise bandwidth efficiency with sine wave modulation VMSK [J]. Microwaves & RF, 2001, 40(4): 79.
 - [6] 李小平, 吴乐南. 一类规范的类正弦 VMSK 调制的功率谱分析[J]. 电波科学学报, 2003, 18(6): 722-726.
- LI Xiao-ping, WU Le-nan. Power spectra analysis for a stan-

dard sine-like VMSK modulation [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(6): 722-726. (in Chinese)

- [7] 李滔, 汤建龙, 杨绍全. 基于时频分布的信号相位跳变检测与估计方法[J]. 信号处理, 2006, 22(1): 15-19.
- LI Tao, TANG Jiang-long, YANG Shao-quan. The detection and estimation of phase discontinuity using Time-Frequency distribution [J]. Signal Processing, 2006, 22(1): 15-19. (in Chinese)
- [8] 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): 16-20.
- 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): 16-20. (in Chinese)

作者简介:

王红星(1962-),男,河南商丘人,海军航空工程学院教授、博士生导师,主要研究方向为现代通信新技术与编码理论;

WANG Hong-xing (male) was born in Shangqiu, Henan Province, in 1962. He is now a professor and also the supervisor of Ph.D. candidate in Naval Aeronautical and Astronautical University. His research interests include the new technology of modern communication and coding theory.

王洪利(1979-),男,山东鱼台人,博士研究生,主要研究兴趣为现代通信新技术与编码技术等;

WANG Hong-li (male) was born in Yutai, Shandong Province, in 1979. He is currently working toward the Ph.D. degree at Naval Aeronautical and Astronautical University. His research interests include the new technology of modern communication and coding theory.

Email: hand-speaker@163.com

毛忠阳(1978-),男,河南人,海军航空工程学院电子信息工程系讲师,主要研究方向为现代通信新技术等;

MAO Zhong-yang (male) was born in Henan Province, in 1978. He is now a lecturer in Naval Aeronautical and Astronautical University. His research direction is the new technology of modern communication.

王 阳(1978-),男,黑龙江人,工程师,主要研究方向为通信信号处理与电子对抗。

WANG Yang (male) was born in Heilongjiang Province, in 1978. He is now an engineer. His research interests include communication signal processing and electronic countermeasure.