

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.11.006

大动态 PCM/FM 遥测信号的非相干解调*

谢顺钦^{1,**}, 王世练², 杨 春¹

(1. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 长沙 410073)

摘 要:针对大动态低码率 PCM/FM 遥测信号的可靠接收问题展开研究, 给出了一种基于连续相位调制 (CPM) 信号原理的载波频偏校正及差分序列检测的非相干接收方案。针对限幅鉴频、多符号检测及差分序列检测等 3 种非相干解调算法, 介绍了各自应用于 PCM/FM 信号的算法原理, 并比较了 3 种算法的解调性能及对大动态环境的适应能力。计算机仿真表明, 在无残留频偏情况下, 2 符号相位差分序列检测性能最好; 但在 0.05 倍码速率的残留频偏下, 1 符号相位差分序列检测的性能更好, 优于 2 符号相位差分序列检测、限幅鉴频检测和多符号非相干检测。对 PCM/FM 信号的讨论包含了几种典型的非相干解调, 对大动态环境下的 PCM/FM 接收有重要的参考价值。

关键词:PCM/FM; 大动态; 非相干解调; 差分解调

中图分类号:TN927; TN763 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)11-01428-07

Non-coherent Demodulations for Large Dynamic PCM/FM Telemetry Signal

XIE Shun-qin¹, WANG Shi-lian², YANG Chun¹

(1. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense and Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Reliable receptions for pulse-code modulation/frequency modulation (PCM/FM) telemetry signal with low-bit-rate in large dynamic conditions are studied. A non-coherent scheme based on continuous phase modulation (CPM) principles is proposed, which includes the correction of carrier frequency offset and differential phase sequence detection by Viterbi algorithm. Principles of three types of non-coherent demodulations for PCM/FM, i. e. limited-discriminator detection, multiple-symbol detection and differential phase sequence detection, are discussed. Their detection performances and adaptabilities to large dynamic conditions are compared as well. Computer simulations show that the sequence detection for 2-symbol phase difference performs the best when without residual Doppler frequency offset. While with a frequency offset of 0.05 times of symbol rate, the sequence detection for 1-symbol phase difference is better than that for the 2-symbol phase difference, and also better than the other two methods. The discussions about PCM/FM signal include three typical non-coherent demodulations, which are important references to the receptions of PCM/FM signal in large dynamic conditions.

Key words: PCM/FM; large dynamic; non-coherent demodulation; differential detection

1 引 言

PCM/FM 信号是脉冲编码-频率调制信号, 是

一种常用的遥测体制。传统的 PCM/FM 信号通过调频 (FM) 信号的解调方式进行解调, 由于其可看作

* 收稿日期: 2013-07-01; 修回日期: 2013-10-10 Received date: 2013-07-01; Revised date: 2013-10-10

基金项目: 国家自然科学基金-中物院 NASF 联合基金项目 (10876103)

Foundation Item: The Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China and China Academy of Engineering Physics NSAF (No. 10876103)

** 通讯作者: suntrain08@gmail.com

Corresponding author: suntrain08@gmail.com

经过预调滤波的 CPFSK 信号^[1],即具有连续相位特性,因此可以参照连续相位调制(Continuous Phase Modulation,CPM)信号的解调方法进行解调和检测^[2]。相干的方法有基于最大似然序列检测(Maximum Likelihood Sequence Estimation,MLSE)的最佳检测^[3]、基于多符号检测的相干检测(Multi-Symbol Coherent Detection,MSCD)^[4]等;非相干的方法有应用最广的限幅鉴频解调(Limited Discriminator,LD)^[5]、多符号非相干检测(Multi-Symbols Non-coherent Detection,MSND)^[4,6-7]相位差分解调(Differential Phase Detection,DPD)^[8],以及应用在通用计算机上的基于短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform,STFT)的瞬时测频解调方法^[9-11]等。

由于遥测目标的高速飞行,导致接收信号有较大的多普勒频率以及多普勒变化率,表现出大动态特性。尤其在码速率较低的窄带情况下,大动态多普勒频率通常会与信号带宽相当甚至超过信号带宽,这给 PCM/FM 信号的解调带来了一定的挑战。

大动态 PCM/FM 信号的接收通常应用快速傅里叶变换(FFT)估计联合鉴频解调^[12-13]。文献[12]利用基于 FFT 的方法得到接收信号的多普勒频率粗估计,然后进行数字鉴频解调,通过鉴频后的差分运算进一步消除残留频偏。但 PCM/FM 信号为抑制载波且难以获得频域离散谱线的信号,基于 FFT 的频率估计在大动态窄带条件下,特别是信噪比较低的场合精度较差,同时鉴频解调的性能相对于差分序列检测和多符号检测等算法较差,并存在门限效应。因此,本文寻求比基于 FFT 频率估计更加适用于大动态窄带条件下的频率估计方法,并在该方法的估计精度基础上,讨论比鉴频解调性能更好、且不存在门限效应的多符号非相干检测和差分序列检测,找到更适用于大动态环境的非相干解调算法。由于大动态环境下接收端的解调应具备复杂度低、实时性好等条件,而相干解调要求严格的载波同步、实现复杂度高、大动态条件下锁相环容易失锁等,对大动态的适应性差,因此本文不讨论相干解调。另外,本文研究的是方便在硬件上实现的算法,对 STFT 这类软件化解调算法暂不予考虑。

2 PCM/FM 信号模型

PCM/FM 信号已通过数字波形合成方法^[14-15]实现,其原理是将 PCM 信号通过预调滤波器滤除高频分量,然后对载波进行频率调制。其复基带的表

达式为

$$s(t) = I(t) + jQ(t) = e^{j\phi(t)} \tag{1}$$

其中,瞬时相位 $\phi(t)$ 可表示为

$$\phi(t) = \int_{-\infty}^t D_f m(\tau) d\tau \tag{2}$$

其中, $D_f=2\pi K_f$ 为调频指数, K_f 为调制常数, $m(t)$ 为预调滤波后的信号。设预调滤波器冲激响应为 $h(t)$,则 $m(t)$ 可表示为

$$m(t) = \sum_n a_n \delta(t - nT) \otimes h(t) = \sum_n a_n h(t - nT) \tag{3}$$

其中, a_n 为不归零 PCM 码元经映射得到的双极性码, $\delta(t - nT)$ 为抽样序列, $\otimes$ 代表卷积。在 $nT \leq t \leq (n+1)T$ 时间间隔内,PCM/FM 的瞬时相位可表示为

$$\begin{aligned} \phi(t;\alpha) &= 2\pi K_f \sum_n a_n \int_{-\infty}^t h(\tau - nT) d\tau = \\ &= 2\pi K_f \sum_n a_n H(t - nT) \end{aligned} \tag{4}$$

已知单调制指数连续相位调制(CPM)信号的瞬时相位 $\psi(t)$ 有如下表达式^[16]:

$$\psi(t;\alpha) = 2\pi h \sum_i \alpha_i q(t - iT), nT < t < (n+1)T \tag{5}$$

其中, h 为调制指数, α_i 为多进制码元符号, $q(t)$ 为相位响应脉冲。将式(4)与式(5)比较不难发现,PCM/FM 信号也可以看成一种 CPM 信号。实际上,通常可以将 PCM/FM 信号视为频率响应波形为 2RC(脉宽为 2 个符号周期的升余弦脉冲)的 CPM 信号^[2],并取调制指数 h 为 0.7。

3 大动态 PCM/FM 同步与解调

当接收到的 PCM/FM 信号多普勒频偏较大,特别是在窄带条件下,要求接收端频率跟踪环捕获范围大,相关的解调算法能容忍一定的多普勒频偏等。针对这一要求,我们提出如图 1 所示的同步与解调方案。

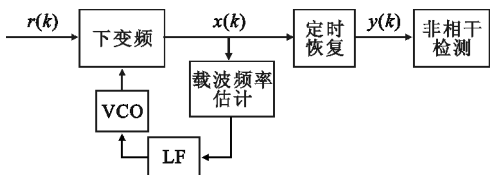


图 1 大动态 PCM/FM 信号同步与解调方案
Fig. 1 Scheme of synchronization and demodulation for large dynamic PCM/FM signal

如图 1 所示,首先对大动态的 PCM/FM 信号作载波频率估计,并通过频率跟踪环校正多普勒一阶变化率及二阶变化率,实现对载波频率的有效跟踪,接着进行定时恢复及非相干解调。本文所用的载波频率估计方法将在后续的论文中详细介绍,在此只简述其原理:首先利用 FFT 估计大动态的频谱范围,将初始多普勒频偏校正到信号带宽以内,然后再利用跟踪环路进行跟踪。跟踪环路的频偏估计方法主要采用基于 PAM 分解的非数据辅助估计方法^[17]。此算法的优点主要是算法结构简单、实现方便、频偏捕获范围大,同时与符号定时独立。当然,和其他非数据辅助的方法一样,此类算法估计精度较差。

经仿真验证,在 100 kHz 的窄带 PCM 码速率条件下,假设大动态条件为 2 MHz 的多普勒初始频率、200 kHz 的多普勒一阶变化率及 30 kHz 的多普勒二阶变化率,其估计的均方误差为 10^{-3} 左右(归一化到码速率 R_b),也即频率估计残留误差的绝对值为 $3\% \sim 5\% R_b$ 左右,这一残留频偏需要在讨论非相干解调性能时予以考虑。另外,限于篇幅,定时恢复算法在本文中暂不予介绍。

4 非相干解调

4.1 限幅鉴频解调

限幅鉴频解调是目前 PCM/FM 信号解调的最常用方法。该方法对接收到信号先进行限幅,保证鉴频后的包络等幅,然后利用数字鉴频完成解调。数字鉴频可以先进行数字鉴相,然后进行一阶差分鉴频,也可以通过差积鉴频的方式完成数字鉴频,差积鉴频方法的框图如图 2 所示。

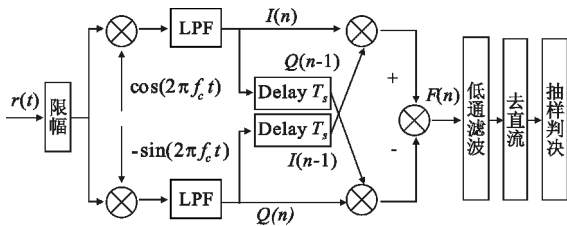


图 2 差积鉴频解调原理框图

Fig. 2 Functional block diagram of demodulation with differential product discriminator

差积鉴频的原理推导可以查阅文献[5],此处不再赘述。值得指出的是,残留频偏会造成鉴频值有一直流分量,抽样判决前先去掉该直流分量,可以去除残留载波频偏的影响。

4.2 多符号非相干检测

多符号非相干检测最早是在 CPFSK 的非相干检测中提出的^[4],后被应用到了 PCM/FM 信号^[18]。本文简单介绍这种方法实现非相干检测的原理。其算法如图 3 所示,下变频后的基带信号 $s(t)$ 与相关器组 $f(t, I_{k+1}, A_k)$ 作相关,其中 I_{k+1} 表示待判决的符号, A_k 为观察区间内除了待判决符号 I_{k+1} 以外的多符号序列。区别于全响应的 CPFSK 信号,对部分响应的 PCM/FM 信号,序列 A_k 需要考虑存在码间串扰的符号,取法为

$A_k = (I_{k-n}, I_{k-(n-1)}, \dots, I_k, I_{k+2}, \dots, I_{k+n}, I_{k+n+1})$ (6)

待判决符号的前端取 $n+1$ 个符号,后端取 n 个符号。 $2n+1$ 个符号组成的序列 A_k 共 m 种不同取值,其中 $m = 2^{2n+1} = 2^{D+1}, D = 2n$ 。

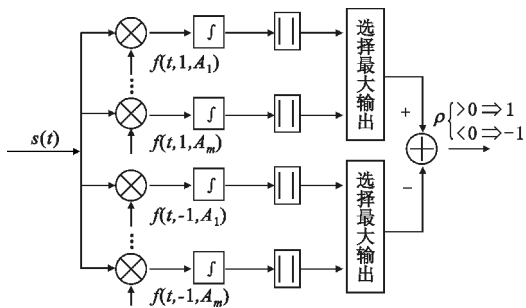


图 3 多符号非相干检测框图

Fig. 3 Block diagram of multi-symbol non-coherent demodulation

设下变频后的 PCM/FM 信号复基带形式(暂不考虑噪声的影响)为

$s(t) = I + jQ = e^{j[\phi(t, I) + \theta_0]}$ (7)

式中, θ_0 为载波的初始相位。设相关器为

$f(t, \tilde{I}) = e^{j(\phi(t, \tilde{I}) + \theta_1)}$ (8)

式中, θ_1 为本地波形的初始相位。则相关运算得到

$$m(\tilde{I}) = \int_0^T s(t) f^*(t, \tilde{I}) dt = e^{j(\theta_0 - \theta_1)} \int_0^T \exp[j(\phi(t, I) - \phi(t, \tilde{I}))] dt$$
 (9)

对相关器输出取模得

$|m(\tilde{I})| = \left| \int_0^T \exp[j(\phi(t, I) - \phi(t, \tilde{I}))] dt \right|$ (10)

可以看出,取模去掉了载波相位 θ_0 与本地波形相位 θ_1 不一致带来的影响。式(10)满足以下不等式:

$$|m(\tilde{I})| = \left| \int_0^T \exp[j(\phi(t, \tilde{I}) - \phi(t, I))] dt \right| \leq \int_0^T |\exp[j(\phi(t, \tilde{I}) - \phi(t, I))]| dt = T$$
 (11)

不等式等号成立的条件是

$$\phi(t, \tilde{I}) = \phi(t, I) \tag{12}$$

即当序列 $\tilde{I}$ 和 I 相同时,相关器的输出最大,因此选择具有最大相关值的序列输出,可以正确检测。

4.3 相位差分序列检测

所谓相位差分,是将接收到的复信号延时之后取共轭与未延时的信号相乘,这相当于将不同时刻信号的相位作差分,相位差分检测如果不用序列检测,而是直接硬判决,则性能与鉴频算法的性能相近。然而相位差分操作去掉了信号的初始相位(载波相位或累积相位),得到的相位差分信号可以看作是相干解调后的信号,再利用差分信号的记忆性,便可对该信号进行最大似然序列检测,即相位差分序列检测(Differential Phase Sequence Detection, DPSD)。DPSD 的原理如图 4 所示。

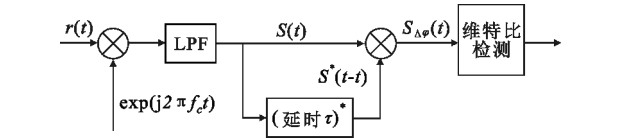


图 4 差分序列检测的原理框图

Fig.4 Functional block diagram of differential sequence detection

接收信号 $r(t)$ 下变频之后得到基带信号(暂不考虑残留频偏和噪声)表示为式(7)。

nT 至 $(n+1)T$ 时间间隔内 k 符号相位差分值为

$$\Delta\phi(t) = \phi(t, I) - \phi(t - kT, I) = 2\pi h \left[\sum_{i=1}^n I_i q(t - iT) - \sum_{i=1}^{n-k} I_i q(t - T - iT) \right] \tag{13}$$

其中, I 为发送信号序列, $q(t)$ 为相位响应脉冲。将 $q(t)$ 分段:

$$\begin{cases} q_0(t) = q(t), t < 0 \\ q_i(t) = q(t), t \in [(i-1)T, iT] (1 \leq i \leq 2) \\ q_3(t) = q(t), t > 2T \end{cases} \tag{14}$$

对部分响应长度为 2 的 CPM 信号 $q(t)$ 满足: $q_0(t) = 0, q_3(t) = 0.5$ 。

由于差分间隔符号 k 越大,虽然从理论上讲性能会越好,但复杂度会呈指数上升,考虑到最终实现的复杂度,本文只研究 1 符号差分序列检测(也可以叫 1 比特差分维特比检测,1 bitDVA)和 2 符号差分序列检测(2 bitDVA)。对 PCM/FM 信号作 1 符号和 2 符号差分之后,相位差分值分别为

$$\begin{cases} \Delta\phi_{1\text{bit}}(t, I) = 2\pi h \{ I_n [q_1(t) - 0] + I_{n-1} [q_2(t) - q_1(t)] + I_{n-2} [0.5 - q_2(t)] \} \\ \Delta\phi_{2\text{bit}}(t, I) = 2\pi h \{ I_n [q_1(t) - 0] + I_{n-1} [q_2(t) - 0] + I_{n-2} [0.5 - q_1(t)] + I_{n-3} [0.5 - q_2(t)] \} \end{cases} \tag{15}$$

式(15)可定义 n 时刻维特比检测的状态为

$$S_n = \begin{cases} \{I_{n-1} \ I_{n-2}\}, & 1 \text{ 符号差分} \\ \{I_{n-1} \ I_{n-2} \ I_{n-3}\}, & 2 \text{ 符号差分} \end{cases} \tag{16}$$

由此得到两种相位差分序列检测的维特比状态转移网格如图 5 所示。

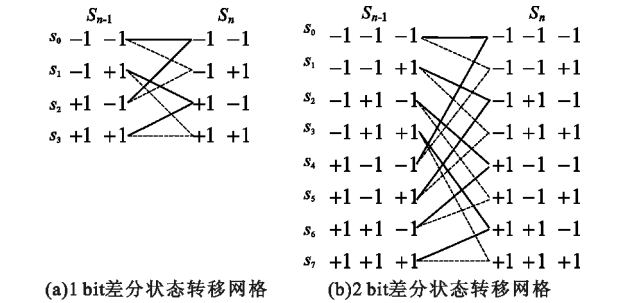


图 5 维特比检测状态转移网格图

Fig.5 State transition grid pattern of Viterbi detection

各个状态的分支度量定义为差分之后的信号 $s_{\Delta\phi}(t)$ 与本地信号 $s_{\Delta\tilde{\phi}}(t)$ 的复相关量的实值为

$$Ed(\Delta\varphi, \Delta\tilde{\phi}) = \text{Re} \left(\int_{nT}^{(n+1)T} s_{\Delta\varphi}(t) \cdot s_{\Delta\tilde{\phi}}^*(t) dt \right) \tag{17}$$

其中, $\text{Re}(\cdot)$ 为取复数的实部,本地信号 $s_{\Delta\tilde{\phi}}(t)$ 满足

$$s_{\Delta\tilde{\phi}}(t) = \exp\{j\Delta\phi(t, \tilde{I})\} \tag{18}$$

其中, $\Delta\phi(t, \tilde{I})$ 见式(15), $\tilde{I}$ 为遍历的信息符号序列。状态和分支度量构造之后就可以通过维特比算法,完成相位差分信号的最大似然序列检测。值得指出的是,1 比特和 2 比特相位差分序列检测分别只需要 4 个和 8 个维特比状态,这样的复杂度相对于调制指数 $h=7/10$ 、频率响应脉冲为 2RC 的 CPM 信号最佳检测(40 个状态)^[16],检测复杂度是很低的。

5 仿真分析

5.1 无多普勒频偏

利用 MATLAB 进行仿真,仿真参数设定为:窄带 PCM 码速率 $R_b=100$ kHz,过采样率(每符号周期

的采样点数)为4,蒙特卡洛仿真的误码比特数为100,得到3种非相干解调算法的误码性能,仿真结果如图6所示。除了3种非相干解调的误码率曲线外,我们将最佳相干解调(MLSD)的误码率曲线也列于其中,用于比较。图中LD曲线代表限幅鉴频算法,MSD($D=2$)和MSD($D=4$)分别代表观察区间为3个符号和5个符号的多符号检测,1bitDVA和2bitDVA代表1符号差分序列检测和2符号差分序列检测。

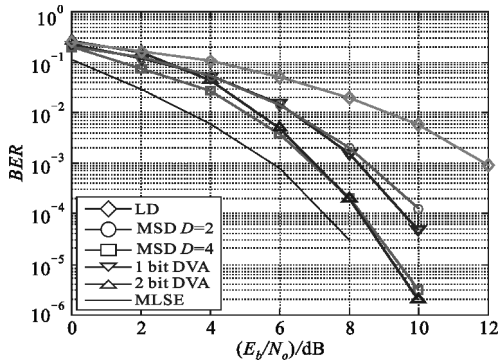


图6 3种PCM/FM非相干解调性能

Fig. 6 Performences of three non-coherent demodulations

通过比较图6中的误码曲线,在不考虑载波残留频偏的影响时,有如下性能结论:

- (1)限幅鉴频的性能是3种算法中最差的,与最佳解调MLSE在 10^{-3} 误比特率附近相差6 dB左右;
- (2) $D=2$ 的多符号非相干检测及1符号差分序列检测性能相近,它们与最佳检测MLSE相比,在 10^{-4} 误比特率下都相差了2~3 dB。在较高信噪比下,1符号差分序列检测的性能比 $D=2$ 的多符号非相干检测性能稍好;
- (3) $D=4$ 的多符号非相干检测与2符号差分序列检测性能相近,它们与最佳检测MLSE相比,在 10^{-4} 误比特率下都相差了1 dB左右,在较低性噪比下多符号检测性能略好于2符号差分序列检测,但在较高性噪比下2符号差分序列检测的性能比 $D=4$ 的多符号非相干检测稍好。

5.2 存在大多普勒频偏

我们在码速率 $R_b=100\text{ kHz}$,多普勒初始频率2 MHz、多普勒一阶变化率200 kHz及多普勒二阶变化率30 kHz的大动态条件下,利用前文提到的载波频率估计算法进行载波频率估计,估计结果存在3%~5% R_b 的估计误差。因此我们人为加入5%的载波残留频偏,对3种非相干解调性能进行仿真,结果如图7所示。

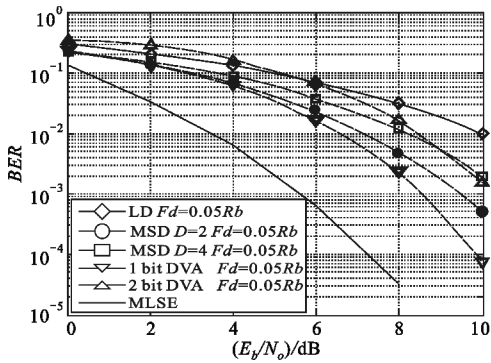


图7 残留频偏 $F_d=0.05R_b$ 时的解调性能
Fig. 7 Demodulation performances with a frequency offset $F_d=0.05R_b$

通过比较加入残留频偏后的误码曲线,可以得到如下结论:

- (1)与无频偏的解调性能(见图6)相比,解调性能恶化最严重的是2符号差分序列检测,以及 $D=4$ 的多符号非相干检测,它们在 10^{-3} 误比特率附近都恶化了3 dB以上;
- (2)性能恶化程度较大的其次是限幅鉴频和 $D=2$ 的多符号非相干检测,它们都恶化了1~1.5 dB;
- (3)解调性能保持最好的是1符号差分序列检测算法,5%的载波残留频偏只使得其解调在 10^{-4} 误码率附近损失0.3 dB,是本文比较的非相干解调算法中性能最为稳健的。

通过比较不同算法的解调性能我们不难发现,在无残留频偏情况下,涉及更多符号的DPSD和MSND性能相比同类算法的性能都会更好一些,这是由于涉及多个符号的算法更充分地利用了信号的记忆性和相关性,从而可以在更高的复杂度条件下得到更好的检测性能。但是当存在残留频偏时,这些算法的性能损失也会更大,这是由于涉及符号越多,时间跨度越大,由于残留频偏所引起的相位偏转也就越大,导致性能的恶化比涉及较少符号的算法更严重。

6 结 论

本文提出先利用基于PAM分解的估计方法对大动态PCM/FM信号作载波频率估计,并在完成定时恢复后利用差分序列检测实现非相干解调方案。综合讨论了3种应用于PCM/FM信号的典型非相干解调算法的原理和性能,并通过计算机仿真完成性能比较和分析。仿真结果表明,在无残留频偏条

件下,2 符号差分序列检测的性能是文中讨论的几种算法中最优的,但在加入 5% R_b 的恒定载波残留频偏后,1 符号差分序列检测性能比 2 符号差分序列检测及其他两种算法更加稳健。因此 1 符号差分序列检测方案能够有效地完成本文讨论的大动态 PCM/FM 信号的非相干检测。

本文所得出的结论对大动态下窄带 PCM/FM 信号的接收问题提供了一定的参考。但同时需要指出的是,本文的研究作了一些理想假设,如加入的残留频偏为固定的多普勒频偏值、定时精度理想等。但实际锁频环的估计值是在不断抖动的,为了实际中的应用,还需要考虑如何消除载频估计抖动所带来的解调影响。另外,相位差分序列检测要求定时精度较高,而高精度的定时估计一般会受到残留频偏的影响,因此在实际应用中还应该考虑到提高大动态 PCM/FM 信号的定时精度问题,这些都是我们需要进一步研究的内容。

参考文献:

- [1] IRIG Standard 106-13, Telemetry Standards. Range Commanders Council Telemetry Group, Range Commanders Council, White Sands Missile Range, White Sands, NM [S].
- [2] Kumaraswamy D. Simplified detection techniques for serially concatenated coded continuous phase modulations [D]. Kansas, USA: University of Kansas, 2007.
- [3] Anderson J B, Aulin T, Sundberg C-E. Digital Phase Modulation [M]. New York: Plenum, 1986.
- [4] Osborne W P, Luntz M B. Coherent and Noncoherent Detection of CPFSK [J]. IEEE Transactions on Communications, 1974, 22(8): 1023-36.
- [5] 卢辉斌, 赵妍婷. 基于 CORDIC 差分鉴频解调算法的 PCM/FM 遥测接收系统 [J]. 信息与控制, 2012, 41(4): 459-64.
LU Hui-bin, ZHAO Yan-ting. PCM/FM Telemetry Receiving System Based on CORDIC Differential Frequency Demodulation Algorithm [J]. Information and Control, 2012, 41(4): 459-64. (in Chinese)
- [6] Wu Z, Zhao N, Li S, et al. A Novel PCM/FM Multi-symbol Detection Algorithm for FPGA Implementation [J]. Information Technology Journal, 2009, 8(4): 583-8.
- [7] 孔冬. 多符号检测技术在 PCM/FM 解调中的性能研究 [J]. 计算机光盘软件与应用, 2011, 11(1): 151.
KONG Dong. Study of Multiple Symbol Detection Technology in PCM/FM Demodulator [J]. Computer Cd Software And Applications, 2011, 11(1): 151. (in Chinese)
- [8] Liu L, Wang S L, Zhang W, et al. One-Symbol Differential Trellis Detector for Multi-h CPM Signal [C]//Pro-

- ceedings of 2012 8th International Conference on the Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Shanghai: IEEE, 2012: 1-4.
- [9] 李秋娜, 袁嗣杰, 章兰英. 基于虚拟无线电的 PCM/FM 信号解调方法 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(7): 1617-23.
LI Qiu-na, YUAN Si-jie, ZHANG Lan-ying. Method of Demodulation for PCM/FM Signal Based on Virtual Radio [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(7): 1617-23. (in Chinese)
- [10] 章兰英, 袁嗣杰, 侯孝民, 等. 基于 DSTFT 的 PCM/FM 信号软件化解调方法研究 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2008, 19(1): 94-8.
ZHANG Lan-ying, YUAN Si-jie, HOU Xiao-min, et al. Research on Method of Software Demodulation for PCM/FM Signal Based on DSTFT [J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2008, 19(1): 94-8. (in Chinese)
- [11] 付刚, 侯孝民, 郑海昕, 等. PCM/FM 信号软件解调算法研究 [J]. 遥测遥控, 2012, 33(4): 31-6.
FU Gang, HOU Xiao-min, ZHENG Hai-xin, et al. Research on Software Demodulation Method for PCM/FM Signal [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2012, 33(4): 31-6. (in Chinese)
- [12] 唐扬. 大动态多普勒频移下 PCM/FM 解调算法的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
TANG Yang. Research On Demodulation Algorithm Of PCM/FM With Large Dynamic Range Doppler Frequency Shift [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [13] 陈大海, 张健, 吕幼新. 遥测接收机的一种载波频偏抑制方法 [J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(5): 720-723.
CHEN Da-hai, ZHANG Jian, LV You-xin. A New Scheme to Suppress Carrier Frequency Deviation for Telemetry Receiver [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(5): 720-723. (in Chinese)
- [14] 卢欣, 杨春, 张健. 基于数字波形合成的 PCM/FM 调制技术 [J]. 遥测遥控, 2005, 26(4): 36-40.
LU Xin, YANG Chun, ZHANG Jian. Modulation for PCM/FM signal based on Digital Wave Synthesis [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2005, 26(4): 36-40. (in Chinese)
- [15] 卢欣, 吴中川, 杨春, 等. PCM/FM 调制器的设计仿真与实现 [J]. 通信技术, 2009, 42(11): 16-8.
LU Xin, WU Zhong-chuan, YANG Chun, et al. Simulation and Implementation of PCM/FM Modulator [J]. Communications Technology, 2009, 42(11): 16-8. (in Chinese)
- [16] Proakis J G. Digital Communications [M]. New York:

McGraw-Hill, 2008.

[17] D’andrea N A, Ginesi A, Mengali U. Frequency Detectors for CPM Signals [J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43(2/3/4): 1828-37.

[18] Geoghegan M. Improving the detection efficiency of conventional PCM/FM telemetry by using a multi-symbol demodulator[C]//Proceedings of 2000 International Telemetry Conference. San Diego, CA, USA;IEEE, 2000: 675-682.

作者简介:



谢顺钦(1987—),男,贵州贵定人,2011年于清华大学获工学学士学位,现为中国工程物理研究院硕士研究生,主要研究方向为PCM/FM 遥测信号的接收;

XIE Shun - qin was born in Guiding, Guizhou Province, in 1987. He received the B. S.

degree from Tsinghua University in 2011. He is now a graduate student. His research concerns the receptions of PCM/FM telemetry signal.

Email:suntrain08@gmail.com

王世练(1976—),男,江苏徐州人,博士,副教授、硕士生导师,主要研究方向为无线通信侦查、LPI 通信、通信抗干扰、网络对抗;

WANG Shi-lian was born in Xuzhou, Jiangsu Province, in 1976. He is now an associate professor with the Ph. D. degree and also the instructor of graduate students. His research interests include wireless communications investigation, LPI communications, antijammer communication and network confrontation.

杨 春(1972—),男,四川绵竹人,研究员,主要从事数据采集、信号处理方面的研究。

YANG Chun was born in Mianzhu, Sichuan Province, in 1972. He is now a senior engineer of professor. His research concerns data acquisition and signal processing.