

遥测接收机的一种载波频偏抑制方法

陈大海^{1,2}, 张健², 吕幼新¹

(1. 电子科技大学电子工程学院 成都 610054; 2. 中国工程物理研究院电子工程研究所 四川 绵阳 621900)

【摘要】讨论了一种PCM/FM遥测数字接收机的载波频偏抑制方法。理论推导证明,在全数字接收机条件下,载波频偏对于理想FM解调输出信号的影响相当于对其进行了幅度调制。因此基于滑窗最大最小值法对鉴频后的信号进行平均包络检测,再从中减去平均包络部分,从而得到频偏抑制后的信号。给出了设计实例和计算机仿真结果,误码率测试曲线表明该方法不但有效,而且能够适应较大的频偏变化率。

关键词 载波频偏; 数字接收机; PCM/FM; 滑窗
中图分类号 TN914.2 **文献标识码** A

A New Scheme to Suppress Carrier Frequency Deviation for Telemetry Receiver

CHEN Da-hai^{1,2}, ZHANG Jian², and LÜ You-xin¹

(1. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;
2. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics Mianyang Sichuan 621900)

Abstract A new scheme to suppress carrier frequency deviation for PCM/FM telemetry digital receiver is presented. Theoretical deduction proves that under the condition of all digital receiver, the ideal FM demodulated signal is equivalent to a signal with amplitude modulated by the frequency deviation. From this theoretical result, we propose a new scheme to suppress the carrier frequency deviation. Design examples and computer simulation show the new scheme is effective and applicable for more higher frequency variable rate.

Key words carrier frequency deviation; digital receiver; PCM/FM; slip window

PCM/FM是一种国内外广泛使用的遥测体制,许多文献开展了大量的研究^[1-5]。过去,PCM/FM信号通常采用低解调门限的锁相调频法进行接收。当环路锁定时,VCO能够自动跟踪载波频偏的变化,而无需采用特殊的抑制措施,即只要信号落入中频接收带宽之内,就可以保证接收;但需要增加中频滤波器的带宽,因此会损失接收灵敏度^[2]。

随着技术的进步,PCM/FM信号的接收采用中频采样和全数字解调方法实现。由于信号本身为调频信号,采用常规的数字化频率估计方法将不起作用^[6-7],因为在频域上很难区分是调制信号还是载波频偏,因此需要寻找其他有效的方法。文献[8]研究了一种基于二阶数字锁相环的频偏抑制方法,其基本原理是利用数字锁相环误差传递函数的高通特性,滤除混叠在信号中慢变的载波频偏部分。但是该方法存在以下的缺点:(1) 数字锁相环在滤除误差

信号的同时,也将有用信号的低频分量滤掉了;而PCM信号却包含较丰富的低频分量。(2) 当频偏变化率较大时,环路带宽必须取大才能跟上其变化,造成有用信号的损失大为增加,甚至抵消频偏抑制所带来的好处。(3) 数字锁相环结构较为复杂,包括鉴相器、二阶环路滤波器和NCO,采用FPGA实现时会消耗较多的硬件资源。

经过FM解调以后,载波频偏对PCM/FM解调的影响等效为对理想的解调输出进行了幅度调制,因此采用滑窗最大最小值法对鉴频后的输出进行包络检测,再从中减去幅度调制部分,从而获得频偏抑制后的信号。该方法与文献[8]的方法比较具有以下优点:(1) 算法简洁,仅包括简单的移位和比较运算,不包括乘法,大大节省了计算量,有利于FPGA实现。(2) 能够适应更大的频偏变化率,而不会造成信号的明显损失,因此适用性更强。

收稿日期: 2007-03-16; 修回日期: 2007-09-25

基金项目: 部级预研基金(4210109-4)

作者简介: 陈大海 (1970-), 男, 副研究员, 主要从事遥测数字接收机方面的研究。

1 PCM/FM信号载波频偏抑制方法

1.1 PCM/FM全数字接收机

PCM/FM中频采样数字接收机的组成框图如图1所示。

设经过抗混叠滤波后的中频PCM/FM信号为:

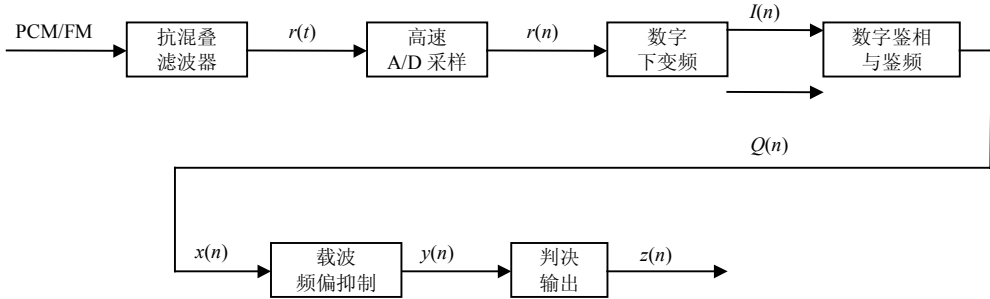


图1 PCM/FM中频采样数字接收机

A/D变换器按照采样率 f_s 对 $r(t)$ 进行采样, 采样信号为:

$$r(n) = \cos \{ 2\pi [f_0 + \Delta f(n)] nT_s + 2\pi k_f \sum_0^n m(n)T_s + \theta_0 \} \quad (2)$$

式中 T_s 为采样周期。

数字下变频采用本地振荡信号 $e^{-j2\pi f_0 nT_s}$ 对 $r(n)$ 进行混频, 再经过低通滤波后得到基带 $I(n)$ 、 $Q(n)$ 信号分别为:

$$I(n) = A \cos \{ 2\pi \Delta f(nT_s) nT_s + 2\pi k_f \sum_0^n m(nT_s)T_s + \theta_0 \} \quad (3)$$

$$Q(n) = A \sin \{ 2\pi \Delta f(nT_s) nT_s + 2\pi k_f \sum_0^n m(nT_s)T_s + \theta_0 \} \quad (4)$$

式中 A 为数字下变频的处理增益。由式(3)和式(4)可见, $I(n)$ 和 $Q(n)$ 信号中包括了调制信号、载波频偏以及初始相位。对 $I(n)$ 和 $Q(n)$ 进行数字鉴相, 并假设该过程是理想的, 可得到鉴相输出为:

$$\theta(n) = 2\pi [\Delta f(nT_s) nT_s + k_f \sum_0^n m(nT_s)T_s] + \theta_0 \quad (5)$$

对 $\theta(n)$ 再进行一阶差分运算, 得到鉴频输出为:

$$x(n) = \frac{\theta(n) - \theta(n-1)}{2\pi k_f T_s} = m(nT_s) + \frac{\Delta f [nT_s] n - \Delta f [(n-1)T_s] (n-1)}{k_f} \quad (6)$$

由于频偏变化相对于符号率(或采样率)为慢变过程, 因此式(6)可进一步简化, 得到近似的鉴频输出为:

$$r(t) = \cos \{ 2\pi [f_0 + \Delta f(t)] t + 2\pi k_f \int_0^t m(t) dt + \theta_0 \} \quad (1)$$

式中 f_0 为载波频率; $\Delta f(t)$ 为载波频率变化部分; k_f 为峰值调频频偏; $m(t)$ 为双极性的调制信息; θ_0 为载波初始相位。

$$x(n) = m(nT_s) + \frac{\Delta f [nT_s] n - \Delta f [(n-1)T_s] (n-1)}{k_f} \approx m(nT_s) + \frac{\Delta f [(n-1)T_s]}{k_f} \quad (7)$$

可见, $x(n)$ 中包括了理想的解调输出 $m(nT_s)$ 和载波频偏引起的误差分量 $\Delta f [(n-1)T_s] / k_f$ 。 $m(nT_s)$ 为关于零电平对称的双极性信号, 但由于叠加了误差信号, 因此 $x(n)$ 关于零电平不再对称, 相当于误差信号对理想解调输出进行了幅度调制。

1.2 基于滑窗最大最小值法进行载波频偏抑制

基于滑窗最大最小值法进行正负包络检测的原理是: 选取滑窗长度为 N , 然后在 N 点数据中分别取最大和最小值, 并以步长为1进行滑动, 连续求取滑窗内的最大最小值, 则所有的最大最小值连在一起就是所求取的正包络和负包络^[9]。

基于滑窗最大最小值法进行载波频偏抑制的原理如图2所示。对式(7)的鉴频输出 $x(n)$ 分别用滑窗最大最小值法进行正负包络检测, 取两者的平均值作为包络检测的估值 $y(n)$; 再从 $x(n)$ 中减去 $y(n)$ 即得到频偏抑制后的信号 $z(n)$ 。采用这种方法巧妙地将载波频偏抑制的问题转化为包络检测问题。

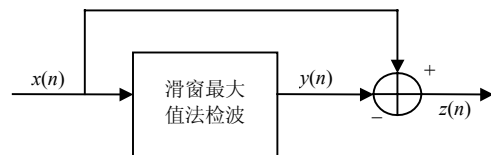


图2 本文提出的载波频偏抑制方法

2 设计实例及仿真结果

本文的算法仿真模型如图3所示。由于实际的PCM/FM遥测系统中发端为限制频带, 在信号调制

前要进行低通滤波,滤波器带宽取为1倍码速率^[4]。为了模拟这种情况,本文对双极性信号源的输出进行升余弦波形成形,滚降系数为1;再与载波频偏和高斯白噪声相加,一路直接进行误码率统计,另一路进行频偏抑制处理后,再进行误码率统计。假设

双极性信号码速率为2 Mb/s,幅度为±1;PCM/FM调制采用最佳调制指数0.35,对应的峰值调制频偏为±700 kHz;采样率 f_s 设为码速率的4倍即8 MHz,并假设采样与输入码元同步,即达到了理想的符号同步。

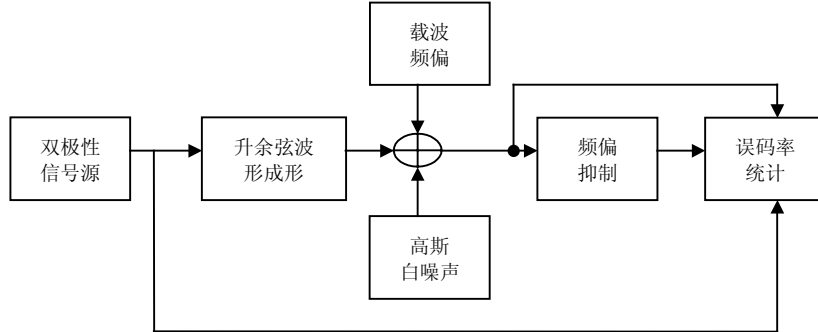


图3 算法的仿真模型

2.1 算法的正确性

载波频偏最大值为350 kHz、变化率为1 kHz时的仿真结果如图4所示,此时的载波频偏信号为:

$$w(n) = \left(\frac{350}{700} \right) \sin \left[2\pi n \left(\frac{1}{f_s} \right) \right] = 0.5 \sin [2\pi n (0.125 \times 10^{-3})] \quad (7)$$

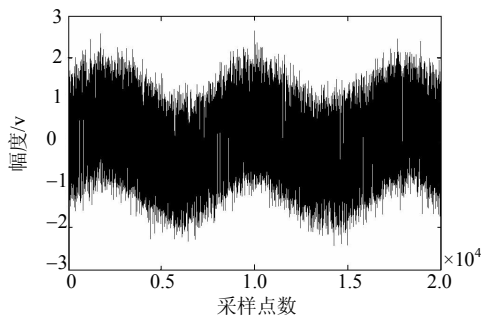


图4 存在载波频偏时的鉴频输出

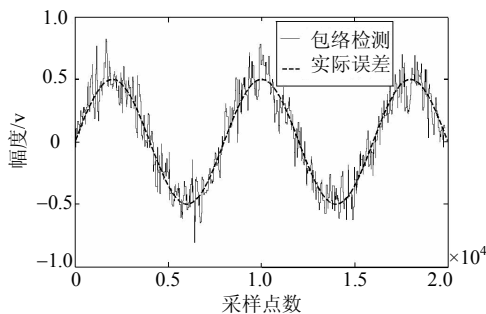


图5 包络检测值与误差真值的比较

仿真码元数为5 000,信噪比为10 dB,滑窗长度取为100。鉴频输出 $x(n)$ 如图4所示;包络检测值 $y(n)$ 与真实的频偏信号 $w(n)$ 的比较如图5所示;频偏抑制后的信号 $z(n)$ 如图6所示,信号又恢复为关于

零电平对称,即克服了载波频偏抑制带来的误差。

2.2 误码率测试结果

本文在仿真中长度采用15 000个码元,信噪比为5~15 dB,变化步长为1 dB。假设载波频偏的最大值仍为350 kHz,但其变化率增大到10 kHz。几种不同情况下的误码率测试曲线如图7所示。每组曲线是仿真10次后再取平均的结果,分别对应以下情况:(1)仅存在噪声,无载波频偏,对 $x(n)$ 进行直接判决。(2)存在载波频偏,对 $x(n)$ 进行直接判决。(3)采用本文的方法对频偏抑制后的信号 $z(n)$ 进行判决,滑窗长度为100。(4)采用文献[8]的方法进行频偏抑制后再判决,环路自由振荡频率设为20 kHz,阻尼系数为0.707^[10]。

从仿真结果可以看出以下的特点:(1)上述第(3)组的曲线比第(2)组的曲线有较大的改善,在高信噪比时尤为明显。(2)第(4)组的曲线接近于第(2)组的曲线,说明在频偏变化率较大时,文献[8]的方法频偏抑制效果较差,甚至失效(在高信噪比时)。(3)比较第(3)组与第(4)组的曲线可知,本文的方法比文献[8]的方法能够适应更大的频偏变化率。

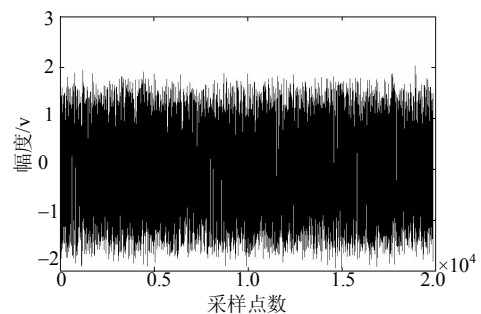


图6 频偏抑制后的输出

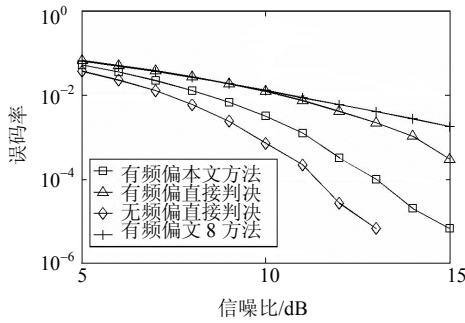


图7 误码率曲线仿真结果

2.3 滑窗长度的选择

在上述仿真过程中假定滑窗长度为100, 事实上, 在给定滚降系数、采样率和频偏变化率的情况下, 滑窗长度的大小将影响频偏抑制的效果。频偏抑制的好坏取决于包络检测值 $y(n)$ 与真实的频偏信号 $w(n)$ 之间的相似程度。当滑窗长度取得太小时, $y(n)$ 的检测误差将增大, 因而频偏抑制效果较差; 而当滑窗长度取得太大时, 虽然 $y(n)$ 的检测误差减小了, 但 $y(n)$ 和 $w(n)$ 之间的时延将增大, 同样会造成较差的频偏抑制效果。因此, 必然存在一个中间值, 使 $y(n)$ 和 $w(n)$ 之差的均方误差最小, 即最佳滑窗长度为 $N_{optimum}$ 。

以上分析结果可以在如图8所示的仿真曲线中得到证明, 其中频偏峰值仍为350 kHz, 信噪比固定为10 dB, 仿真长度为5 000个码元。该图包括3条曲线, 分别对应频偏变化率为500 Hz、1 kHz和10 kHz。横坐标表示不同的滑窗长度, 范围从10~1 000, 纵坐标为对应的均方误差值。从图中可以看出: (1) 各组曲线都有1个凹点, 对应着最佳滑窗长度和最小的均方误差值。(2) 频偏变化率越大时, 所对应的最佳滑窗长度越小, 最小均方误差值却越大。(3) 频偏变化率越小, 图8中的均方误差曲线越平坦; 反之, 频偏变化率越大, 图8中的曲线起伏越大, 即均方误差的抖动越大。

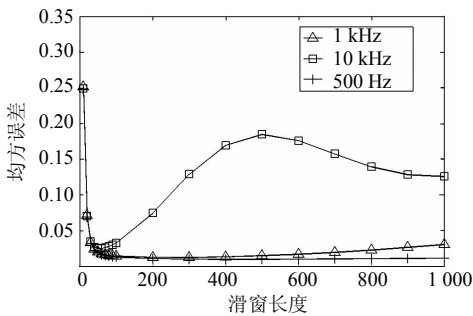


图8 最佳滑窗长度仿真结果

上述仿真结果说明, 对于一个实际的PCM/FM

系统, 应首先估计出其具体的峰值频偏和最大的频偏变化率; 再通过计算机仿真的方法确定其最佳滑窗长度; 然后使用该滑窗长度对FM解调后的输出信号进行载波频偏抑制, 可获得较好的FM解调效果。

3 结束语

理论推导证明, 在全数字接收机的条件下, 载波频偏对于PCM/FM信号解调的影响表现为对理想解调输出进行了幅度调制。因此, 采用滑窗最大最小值法对数字鉴频后的信号进行包络检测, 再从鉴频后的信号中减掉, 可得到频偏抑制后的信号。仿真结果表明该方法的有效性, 对于较大的频偏变化率有较好的适应性。

参 考 文 献

[1] RICE M. PCM/FM aeronautical telemetry in frequency selective multipath interference[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2000, 36(4): 1090-1098.

[2] 肖仕伟, 彭 嵘. 高码速率锁相FM解调器设计[J]. 电讯技术, 2002, 42(4): 9-12.
XIAO Shi-wei, PENG Rong. Design of high bit rate PLL FM demodulator[J]. Telecommunication Engineering, 2002, 42(4): 9-12.

[3] 陈大海, 徐 江, 吕幼新. 一种中频采样模块的设计及其在数字接收机中的应用[J]. 信息与电子工程, 2005, 3(4): 280-282.
CHEN Da-hai, XU Jiang, LÜ You-xin. Design of an IF sampling module and its applications in the digital receivers[J]. Information and Electronic Engineering, 2005, 3(4): 280-282.

[4] 陈大夫, 张尔杨, 朱 江. 快速傅里叶变换载波频偏估计算法[J]. 电路与系统学报, 2006, 11(2): 128-132.
CHEN Da-fu, ZHANG Er-yang, ZHU Jiang. A fast fourier algorithm to estimate carrier frequency deviation[J]. Journal of Circuits and Systems, 2006, 11(2): 128-132.

[5] 郑大春, 项海格. 一种全数字化载波频偏估计器算法[J]. 电子学报, 1999, 27(1): 78-80.
ZHENG Da-chun, XIANG Hai-ge. An algorithm to estimate frequency deviation[J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(1): 78-80.

[6] 谢铭勋. 再入遥测技术(上册)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.
XIE Ming-xun. Reentry telemetry technology[M]. Beijing: Publication House of National Defense Industry, 1992.

[7] 张 健, 向敬成. 软件无线电技术导论[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2001.
ZHANG Jian, XIANG Jin-cheng. Introduction to software radio technology[M]. Chengdu: Publication House of University Electronic Science and Technology of China, 2001.

- Engineering, 1999, 15(20): 168-173.
- [7] 杜慷慨, 林志勇, 吴季怀. 苯乙烯与蒙脱土的接枝反应[J]. 塑料工业, 2001, 29(1): 21-22.
Du Kang-kai, Lin Zhi-yong, WU Ji-huai. Study of styrene graft polymerized on montmorillonite[J]. China Plastics Industry, 2001, 29(1): 21-22.
- [8] 施 凯. 短切碳纤维表面改性及其增强聚四氟乙烯复合材料性能的研究[J]. 新型炭材料, 1999, 14(1): 26-31.
SHI Kai. Research on the modification of chopped carbon fibre and preparation of CF₄ reinforced PTFE composite[J]. New Carbon Materials, 1999, 14(1): 26-31.
- [9] 耿秀娟, 封禄田, 杨海霞. 石蜡熔融接枝苯乙烯的研究[J]. 沈阳化工学院学报, 2003, 17(2): 102-105.
GENG Xiu-juan, FENG Lu-tian, YANG Hai-xia. Study on melt grafting of styrene onto paraffin waxes[J]. Journal of Shenyang Institute of Chemical Technology, 2003, 17(2): 102-105.
- [10] WU L Z, DING J, JIANG H B, et al. Particle size influence to the microwave properties of iron based magnetic particulate composites[J]. Magn Magn Mater, 2005, 285: 233-236.

编辑 张俊

(上接第723页)

- [8] 郑立岗, 吕幼新, 向敬成, 等. PCM/FM遥测系统中用于去除多普勒频率和载波频偏的新方法[J]. 信号处理, 2004, 20(3): 236-240.
ZHENG Li-gang, LÜ You-xin, XIANG Jin-cheng, et al. A new technique to remove Doppler frequency and carrier frequency bias in PCM/FM telemetry system[J]. Signal Processing, 2004, 20(3): 236-240.
- [9] 李 政, 杨建宇, 郑立岗. 高效数字检波的自动增益控制环路研究[J]. 电子科技大学学报, 2005, 34(6): 316-318.
LI Zheng, YANG Jian-yu, ZHENG Li-gang. Research on automatic gain control loop based on digital demodulation[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2005, 34(6): 316-318.
- [10] SHAYAN Y R, LE-NGOC T. All digital phase-locked loop: concepts, design and applications[J]. IEE Proceedings, 1989, 136(1): 53-56.

编辑 黄莘

(上接第745页)

- [10] 方积乾, 陆 盈. 现代医学统计学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2002: 577-602.
FANG Ji-qian, LU Ying. Modern medical statistic[M]. Beijing: Peoples Medical Publishing House, 2002.
- [11] 余 鹏, 封举富. 基于高斯混合模型的纹理图像分割[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(3): 281-285.
YU Peng, Feng Ju-fu. Texture image segmentation based on Gaussian mixture models[J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(3): 281-285.

编辑 熊思亮

• 科研成果专利介绍 •**双倒筒靶结合基片双轴旋转的镀膜装置**

双倒筒靶结合基片双轴旋转的镀膜装置由转动驱动轴、基片导轨以及基片构成, 还包括: 圆筒形靶材、圆筒形热屏蔽层和由多根加热丝围成的圆筒形加热器。装置制备大面积双面薄膜, 在保证大面积双面薄膜的均匀性和两面一致性的同时, 提高了溅射镀膜的沉积速率, 从而提高了大面积双面薄膜的生产效率, 而且随着成膜时间的缩短, 基片与薄膜间的互扩散问题也得到缓解。