#### 文章编号: 1672-2892(2012)05-0528-06

# 基于数字信道化的大动态 PCM/FM 遥测信号角跟踪

张 鹏,王世练,王 昊,张 炜

(国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要:采用单脉冲单通道角跟踪体制,提出一种基于数字信道化实现大动态脉冲编码调制/ 频率调制(PCM/FM)遥测信号的角跟踪方法。由于 PCM/FM 信号是一个窄带信号,而多普勒频偏达 到±1MHz,为了能在较宽的接收带宽、较大多普勒频偏中准确捕获跟踪到窄带 PCM/FM 信号,首 先对接收信号进行数字信道化划分,对多个子信道同时检测,将检测后的数据进行融合、幅度检 波,最后进行角误差的估计。仿真结果表明,本文提出的方法能够快速实现信号的角跟踪,高效 可行。

关键词:单脉冲单通道;角跟踪系统;数字信道化;大动态
 中图分类号:TN919.6
 文献标识码:A

# Angle tracking technology based on digital channelized large dynamic PCM/FM telemetry signals

ZHANG Peng, WANG Shi-lian, WANG Hao, ZHANG Wei

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

**Abstract:** The angle tracking technology based on digital channelized large dynamic Pulse Code Modulation/Frequency Modulation(PCM/FM) telemetry signals is presented by using monopulse angle tracking system. PCM/FM signal is a kind of narrowband signal, whereas the Doppler frequency shift is very large, which reaches to  $\pm 1$ MHz. In order to capture and track the narrowband PCM/FM signals accurately in a broad bandwidth and at large Doppler frequency shift, the digital channelized technology is adopted; and all the subsidiary channels are detected at the same time; the data fusion and amplitude detection are performed after the detection; and finally the angle error is estimated. Simulation results show that the proposed method can achieve signal angle tracking fast, efficiently and feasibly.

Key words: single channel monopulse; angle tracking system; digital channelized; large dynamic

精确的跟踪是进行高精确度测量的前提和保证,临近空间飞行器与地面测控站之间的相对运动速度快,机动 性强,导致测控信号的多普勒频率变化率很大;同时,临近空间飞行器与地面测控站之间角速度及角加速度也很 大,对测控信号的捕获及稳定跟踪提出了更高要求。单脉冲跟踪体制是一种先进的跟踪体制,与步进和圆锥扫面 跟踪相比,单脉冲跟踪体制的跟踪速度和跟踪精确度都更加优越,它能够在1个脉冲间隔内确定天线波束偏离目 标的方向,并且能够驱动伺服系统,使得天线能够迅速对准飞行器。采用这种跟踪体制的突出优点是节省信道, 系统复杂程度明显降低,减少了技术交叉环节,使设备操作简化,有利于可靠性的提高。由于差模耦合跟踪接收 机具有体积小、重量轻、功耗低、可适用性强等优点,所以被广泛应用于测控体系中。考虑窄带 PCM/FM 信号, 信号的最大多普勒频偏达±1 MHz,为了适应±1 MHz 的多普勒频偏范围,信号的检测带宽至少要取 2 MHz。接收 信号的带宽相对检测带宽就显得很小,不易于信号的捕获和跟踪。本文提出了基于数字信道化和多子信道数据融 合的角跟踪方法,将检测带宽划分成相对较小的子带(信号可能存在于1个子信道中,也可能同时跨多个子信道), 然后对每个子信道同时进行信号检测,就能更简单地检测到信号,为后续的跟踪做好准备。大动态的 PCM/FM 信号多普勒频偏大,多普勒频率变化率大,而且接收信号的信噪比较低,所以对于信号的稳定跟踪的难度就较大。 常用的方法是利用锁频环(Frequency Lock Looped, FLL)对信号进行频偏估计并进行频偏补偿,但是这样跟踪的 时间相对较长。本文提出的基于数字信道化的大动态 PCM/FM 遥测信号角跟踪,可快速实现对信号的稳定跟踪。

收稿日期: 2012-07-05; 修回日期: 2012-08-13

# 1 数传信号角跟踪原理<sup>[1]</sup>

测控通信技术的发展要求直接对宽带数传信号进行角跟踪,接收到的 PCM/FM 信号经过差模馈源网络激励 输出的和信号与差信号<sup>[2]</sup>记为:

$$u_0(t) = Ae^{i(\omega t + \phi(t))}$$

$$u_1(t) = A\mu\theta e^{i(\omega t + \phi(t) + \varphi - \gamma)}$$
(1)

式中: A为调制信号幅度;  $\omega$ 为馈源接收的 PCM/FM 信号频率;  $\mu$ 为归一化误差信号斜率;  $\theta$ 为天线偏离卫星的角度;  $\gamma$ 为合路器前和、差信号的相差;  $\phi$ 为调制信号瞬时相位。对于 PCM/FM 信号,  $\phi(t) = K_f \int_{-\infty}^{t} m(\tau) d\tau$ , 其中, m(t)为调制信号,  $K_f$ 为频偏常数。

对于 PCM/FM 信号的角跟踪系统,这里运用四相调制的方式对差信号进行调制。将得到的差信号与和信号 相加并输出:

$$\Sigma + \Delta' = A e^{j(\omega t + \phi)} + A \mu \theta e^{j(\omega t + \phi + \phi - \gamma + K(t))}$$
<sup>(2)</sup>

式中的 K(t) 可表示为:

$$K(t) = \begin{cases} 0, & nT < t < nT + T / 4 \\ \pi / 2, & nT < t < nT + T / 2 \\ \pi, & nT < t < nT + 3T / 4 \\ 3\pi / 2, & nT < t < nT + T \end{cases}$$
(3)

式中: T 为调制方波信号的周期,假设信号的速率远大于 1/T。忽略相位  $\phi$  及和差通道相位差  $\gamma$ ,通道的增益为 k, 并将和、差信号均取实部得到:

$$\Sigma + \Delta' = kA\cos(\omega t) + kA\mu\theta\cos(\omega t + \varphi + K(t))$$
(4)

将得到的单通道信号做数字下变频,然后进行幅度检波,最后经过低通滤波,隔去直流分量,输出:  $u = kA\mu\theta\cos(\varphi + K(t))$  (5)

将得到的信号进行2次同步解调,第1次同步解调分离出交流方位误差信号和俯仰误差信号:

$$U_{H} = \begin{cases} \frac{kA}{2} \mu \theta \cos \varphi, & nT < t < nT + T / 4 \\ 0, & nT < t < nT + T / 2 \\ -\frac{kA}{2} \mu \theta \cos \varphi, & nT < t < nT + 3T / 4 \\ 0, & nT < t < nT + T \\ 0, & nT < t < nT + T / 2 \\ -\frac{kA}{2} \mu \theta \sin \varphi, & nT < t < nT + T / 4 \\ 0, & nT < t < nT + 3T / 4 \\ \frac{kA}{2} \mu \theta \sin \varphi, & nT < t < nT + T \\ \end{cases}$$
(6)

然后经过第2次同步运算,得到方位、俯仰误差电压估计值:

$$\Delta_{\rm EL} = kA\mu\theta\sin\varphi \tag{8}$$

$$\Delta_{\rm AZ} = kA\mu\theta\cos\varphi \tag{9}$$

#### 2 基于数字信道化的角跟踪方法

对于数传信号角跟踪的方法分为2种,第1种是接收机由多个带宽不同的滤波器构成滤波器组,根据不同的 码速率进行切换,其中每个滤波器的带宽分别对应所需要跟踪的数传信号频谱的主瓣宽度;第2种是接收机中频 带宽为数传信号频谱主瓣宽度的小部分(1/5~1/10),采用2个或3个滤波器进行跟踪带宽切换就可适应各种码速 率的跟踪接收机,称之为小部分带宽法。由于本系统的多普勒频偏较大,故采用小部分带宽法。多普勒频偏的存 在使得落入检测带宽内的信号主瓣能量降低,直接影响角误差估计的性能,特别是当信号带宽小于多普勒频偏时, 跟踪带宽至少大于多普勒频偏,这会导致检测信噪比的恶化。为了解决这个问题,提出了基于数字信道化的多子 带同时检测与数据融合的方法,提高多普勒频偏下 PCM/FM 幅度检波的性能。

本文就大动态的 PCM/FM 信号的角跟踪提出了 2 种方案,第 1 种方案是先进行数字信道化,然后对信号进 行检测,检测完以后直接应用等增益合并来完成数据的融合,然后进行角误差的估计,实现信号的角跟踪。第 2 种方案也是先进行数字信道化分路和信号的检测,不同的是信号检测完成以后,接下来进行数字信道化的合成, 然后进行角误差的估计,实现信号的角跟踪。

#### 2.1 数字信道化原理<sup>[3-5]</sup>

所谓数字信道化,就是将一个宽带的信号在频域上进行均匀的信道划分和抽取,然后输出若干个低速窄带信号的过程。本文应用的是基于多相滤波结构的数字信道化方法,信道化个数为 *K*,一般取 2 的整数次幂。图 1 所示为信号的信道划分。



假设第 k 个子信道的中心频率为:

$$\omega_k = (k + \frac{1}{4})\frac{2\pi}{K}, \ k = 0, 1, \cdots, K - 1$$
(10)

图 1 所示的信道划分的特点是用 0~2π 整个频谱来分配信道,实线表示的是信号的主像,而虚线部分表示的 是信号的虚像,从图上可以看出主像的信道间隔为 2π/K,这样原型滤波器(原型滤波器作用等同于防混叠滤波器, 即为防止别的信道的信号进入预定的信道而在预定信道前接入的滤波器)的阻带截止频率为 ω<sub>s</sub> ≤ π/K,保证相邻 的子信道之间没有频谱的混叠。数字信道化的合成为数字信道化的逆过程,这里就不再介绍。

#### 2.2 有效子信道直接检波的角跟踪



Ig.2 Angle tracking of the direct detection of the effective sub-channel block diagram 图 2 有效子信道直接检波的角跟踪原理框图

图 2 给出了有效子信道直接检波的角跟踪实现框图,其中数字信道化的子信道的带宽至少要取 PCM/FM 遥测信号带宽的 1/4~1/8<sup>[6-7]</sup>,而且由于信号主瓣的能量可能不仅仅分布在 1 个子信道中,也有可能同时落在相邻的 子信道中,所以在信号检测时需要对 2~3 个子信道甚至多个子信道同时进行检测。将接收到的 PCM/FM 信号进 行数字信道化后,对每个子信道同时进行信号检测,然后对检测的结果进行信道判决,判断出信号落在哪几个子 信道中。可以理解,当目标信号不包含噪声时,除了目标信号所在的通道输出结果不为零以外,其余各信道输出 结果均为零。所以这里信号检测方法用的是幅度检测的方法,判断信号所在的子信道。



如图 3 所示,对每个子信道做 FFT 进行谱估计。理想情况下,接收带宽内只有高斯白噪声时,由 FFT 得出的频谱在整个频带内比较平坦。而有信号存在时,只包含噪声的频率子带(噪声子带)的幅频特性基本不变,而有信号的频率子带(信号子带)的幅度值通常会高于噪声子带,由频谱的幅值就能判断出信号所在子信道。所以先进

行谱估计,然后由频谱形式确定出检测门限,对每个子信道进行检测,高于检测门限值的说明存在信号,反之则 没有信号,从而判定出信号所在子信道。

判定出信号所在的子信道以后,同时对这一个或者几个子信道进行以能量检测为基础的幅度检波,将检波后的结果进行数据融合,而这里所用到的数据融合的方法为等增益合并<sup>[8]</sup>,最后输出数据融合后的结果进行角误差估计,得到方位角和俯仰角的角误差估计值。

#### 2.3 基于有效子信道合成的角跟踪



Fig.4 Block diagram of angle tracking based on effective sub-channel synthesis 图 4 基于有效子信道合成的角跟踪原理框图

如图 4 所示,与上述方案相同的是,先进行数字信道化,以方便信号的捕获和跟踪,数字信道化后对每个子 信道进行信号检测;不同的是信号检测判定信号所在的子信道后,将这几个子信道进行数字信道化的合成,重构 出原信号,然后将合成后的信号进行幅度检波,最后做角误差的估计得到方位角和俯仰角的角误差估计值。

该方法实质为:由于接收信号的带宽相对于接收机的带宽过小,而且多普勒频偏过大,信号的检测和跟踪难 度大大增加,于是这里先将接收机的带宽

及入入增加, 了定这至几种接收机的带见 划分为相对较小的带宽, 然后对每个子信 道进行检测从而捕获到信号, 进一步将信 号提取出来进行角误差的估计, 由于数字 信道化和数字信道化合成是一个逆过程, 也可以将这个过程看作是信号恢复的过程 或者是信号重构的过程, 数字信道化合成 框图见图 5。

信号的重建是数字信道化的逆过程, 如图所示,信号检测完成后,对每个子信 道做离散傅里叶变换,然后变换后的数据 进行频移,频移后的信号通过一个原型低 通滤波器进行滤波,这时再将滤波后的信



号进行相位旋转,然后1倍内插,而内插的过程就是频谱拼接的过程,最后重建出信号。

# 3 仿真结果及分析

仿真参数设置如下: PCM/FM 数据比特率为  $R_b$  =100 kbps, 调制指数为 0.7; 最大多普勒频偏为  $f_d$  =1 MHz, 信号采样率为  $F_s$  = 2 MHz, 目标的空间偏移角为  $\pi/6$ , 数字信道化的个数为 K =16。

图 6 给出了数字信道化的 PCM/FM 信号频谱图,数字信道化的信道化个数为 16,在 0 到 2π 区间内就划分为 16 等份,图中仅给出了 0 到 π 区间的 8 个信道,可以看出信号的绝大部分能量都分布在第 6 和第 7 信道。





输入信噪比分别取 0 dB,20 dB,40 dB,对上述 2 种方案进行仿真,图 7 和图 8 分别给出了方案一和方案二的 方位/俯仰角电压估计结果,有以下结论:1) 跟踪时间小于 1 ms,跟踪速度快,且随着信噪比的增大,跟踪的性 能越来越好,越来越稳定;2) 信噪比低时仿真结果在实际值附近波动较大,而随着信噪比的增加,误差波动越 来越小,当信噪比达到 20 dB 和 40 dB 时波动已经很小,跟踪误差已经很小;3) 2 种方案的角误差估计方差近似 相等;4) 方案一的方位和俯仰角电压估计值与实际值有微小偏差,但是趋势是正确的,而方案二的方位和俯仰 角电压估计值与实际值一致。



# 4 结论

本文提出了基于数字信道化的 PCM/FM 遥测信号的角跟踪方案, 解决了低信噪比、大多普勒频偏下数传信号的跟踪。仿真表明本文提出的角跟踪的方法可以迅速跟踪到信号, 2 种方案都是高效可行的, 方案一相对比较简单, 易于实现, 方案二相对复杂, 但是精确度比方案一高。

# 参考文献:

- [1] 汪莹,于志坚,于义农.对 PSK 信号实现角跟踪的一种设想[J]. 中国电子科学研究院学报, 2007,12(6):644-647.
   (WANG Ying,YU Zhijian,YU Yinong. An Attempt to Realize the Angle Tracking of PSK Signal[J]. Journal of CAEIT, 2007,12(6):644-647.)
- [2] 石磊,杨春. 高动态目标信号模拟源的设计和实现[J]. 信息与电子工程, 2012,10(2):129-132. (SHI Lei,YANG Chun. Design and implementation of high dynamic target simulated signal generator[J]. Information and Electronic Engineering, 2012,10(2):129-132.)
- [3] 王永明,王世练,张尔扬. 1.2 GSPS数字信道化接收机的设计与实现[J]. 系统工程与电子技术, 2009,31(6):1324-1327. (WANG Yongming,WANG Shilian,ZHANG Eryang. Design and implementation of a 1.2 GSPS digital channelized receiver[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009,31(6):1324-1327.)

# 第5期 张 鹏等:基于数字信道化的大动态 PCM/FM 遥测信号角跟踪

- [4] 杨小牛,楼才义,徐建良.软件无线电技术与应用[M].北京:北京理工大学出版社, 2010. (YANG Xiaoniu,LOU Caiyi, XU Jianliang. Ruanjian Wuxiandian Jishu Yu Yingyong[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press, 2010.)
- [5] 甘建超. 宽带数字信号处理及其在电子战中的应用[J]. 信息与电子工程, 2010,8(4):425-429. (GAN Jianchao. Wide-band digital signal processing with application in electronic warfare[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(4):425-429.)
- [6] 黎孝纯,薛丽. 对宽带数据传输信号的角跟踪理论[J]. 电子学报, 2005,33(10):1079-1082. (LI Xiaochun,XUE Li. Theory of Angel Tracking for Broadband Data Transferred Signal[J]. Acta Electronica Sinica, 2005,33(10):1079-1082.)
- [7] 黎孝纯,朱舸. 再论证"对宽带数据传输信号的角跟踪理论"[J]. 空间电子技术, 2008(2):23-30. (LI Xiaochun,ZHU Ge. And then demonstrate 'Theory of Angel Tracking for Broadband Data Transferred Signal'[J]. SPACE ELECTRONIC TECHNOLGY, 2008(2):23-30.)
- [8] 彭国祥,庄铭杰,林比宏.常见分集合并系统的性能分析[J]. 电讯技术, 2005(6):58-62. (PENG Guoxiang,ZHUANG Mingjie,LIN Bihong. Performance Analysis of Common Diversity Combining Systems[J]. Telecommunication Engineering, 2005(6):58-62.)

# 作者简介:



张 鹏(1988-),男,山东省青岛市人,硕 士,研究方向为现代通信技术.email:zp3424 @163.com. **王世练**(1976-),男,江苏省徐州市人,博 士,副教授,主要研究方向为无线通信技术.

**王 吴**(1989-),男,吉林省白山市人,在 读本科生,主要研究方向为信息工程.

张 炜(1972-), 女, 江苏省扬中市人, 博 士, 副教授, 主要研究方向为无线通信技术.

(上接第 527 页)

# 参考文献:

- Saed T R, Ali J K, Yassen Z T. An FPGA Based Implementation of CA-CFAR Processor[J]. Asian Journal of Information Technology, 2007,6(4):511–514.
- [2] Grydeland T,Lind F D,Erickson P J,et al. Software Radar Signal Processing[J]. Annales Geophysicae, 2005,23(1):109-121.
- [3] 王德生,赵利民,孙立国,等. 信息化、软件化、通用雷达终端的构建与实现[J]. 现代雷达, 2007, 29(12): 22-26.
- [4] NVIDIA Corporation. NVIDIA CUDA C Programming Guide Version 4.1[EB/OL]. [2011-11]. http://developer.nvidia. com/ category/zone/cuda-zone.
- [5] McCool M D. Signal Processing and General-Purpose Computing on GPUs[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007,24(3): 109-114.
- [6] 张辉,孙立国,李世丹,等. 基于可编程显卡的信息化雷达终端显示系统[J]. 信息与电子工程, 2010,8(6):652-655.
- [7] Skolnik M I. 雷达系统导论[M]. 3 版. 左群生,徐国良,马林,等译. 北京:电子工业出版社, 2006.
- [8] Mahafza B R. 雷达系统分析与设计:MATLAB 版[M]. 2 版. 陈志粟,罗群,沈齐,等译. 北京:电子工业出版社, 2008.
- [9] NVIDIA Corporation. CUDA C Best Practices Guide[EB/OL]. [2012-01]. http://developer.nvidia.com/category/zone/cuda-zone.
- [10] 刘振吉,底健. 基于 Windows 平台的测控系统的实时性优化方法[J]. 信息与电子工程, 2008,6(5):383-386.

#### 作者简介:



贾 可(1988-),男,山东省成武县人,在 读硕士研究生,主要研究方向为数据采集、雷达 信号处理技术.email:jiakejiake@gmail.com. **李世丹**(1983-),男,辽宁省大连市人,博 士,主要研究方向为数据融合、雷达终端系统.

**郭** 燕(1987-), 女, 湖北省天门市人, 在 读硕士研究生, 主要研究方向为雷达终端系统.

**王德生**(1946-),男,北京市人,博士生导师,主要研究方向为雷达信号处理和终端系统.