#### doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.05.017

**引用格式:**方正,丁勇飞,龚诚.采用扩频技术的数字天线跟踪系统设计[J].电讯技术,2014,54(5):615-620. [FANG Zheng, DING Yong-fei, GONG Cheng. Design of Digital Antenna Tracking System with Spread Spectrum Technology [J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54 (5):615-620. ]

# 采用扩频技术的数字天线跟踪系统设计\*

# 方 正<sup>1,2,3,\*\*</sup>,丁勇飞<sup>1</sup>,龚 诚<sup>1</sup>

(1.中国航空无线电电子研究所,上海 200241;2.航空电子系统综合技术重点实验室,上海 200233;3.上海交通大学 电子信息与电气工程学院,上海 200240)

摘 要:在介绍雷达领域传统目标跟踪方式基础上,设计了一种基于扩频体制并有效融合"模极值 捕获跟踪"和"数字导引"的数字天线跟踪系统。通过精心设计通信帧格式,并采用具有良好正交性 的 PN 码(Walsh)序列"携带"GPS 信息用于数字导引,使得系统在具有30 dB高同步捕获增益的前提 下同时具有可控的扩频抗干扰增益,在初始捕获和抗干扰通信过程中发挥重要作用。系统采用具有 快速算法的自适应滤波技术对数字导引信息进行置信度分析。建模仿真与飞行试验表明,该方法相 对传统体制具有更高的灵活性和可靠性。

关键词:PD 雷达;目标跟踪;天线跟踪系统;模极值跟踪;数字导引;自适应滤波 中图分类号:TN953;TN820 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2014)05-0615-06

# Design of Digital Antenna Tracking System with Spread Spectrum Technology

FANG Zheng<sup>1,2,3</sup>, DING Yong-fei<sup>1</sup>, GONG Cheng<sup>1</sup>

China National Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Shanghai 200241, China;
 Science and Technology on Avionics Integration Laboratory, Shanghai 200233, China;
 School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A new digital antenna tracking system which combines both module maximum tracking and digital navigation is designed based on introduction of traditional radar antenna target tracking method. The communication frame structure is delicately designed, which ensures both 30 dB high synchronization gain and a reliable wireless transmission. Besides, adaptive filtering with fast calculating method is applied during digital navigation to ensure the credibility of the information. Simulation and flight tests demonstrate that the proposed two-mode antenna tracking method brings much more flexibility and reliability.

Key words: PD radar; target tracking; antenna tracking system; module maximum tracking; digital navigation; adaptive filtering

## 1 引 言

传统的 PD 雷达多采用线性调频(Chirp)信号作 为发射信号,接收机采用脉冲压缩-多普勒(PD)技术 对回波信号进行二维积累(时域脉压和频域 DFT)和 动目标跟踪(MTI)。如果定向天线采用抛物面或固 定相位波束合成的天线形式,那么目标跟踪的精度除 了取决于波束形成的物理特性外(方向精度),还取决 于产生的 Chirp 信号的带宽、脉宽与周期(距离精度 与距离模糊)。动目标跟踪的方向精度、距离精度和 最大不模糊距离的性能要求往往交织在一起,顾此失

 <sup>\*</sup> 收稿日期:2013-09-03;修回日期:2014-04-04 Received date:2013-09-03;Revised date:2014-04-04
 基金项目:航空科学基金资助项目(2013ZC15003)
 Foundation Item: The Aeronautical Science Foundation of China(2013ZC15003)

<sup>\*\*</sup> 通讯作者:149560759@qq.com Corresponding author:149560759@qq.com

彼,且信号处理复杂,运算量较大。如果仅应用 GPS 信息进行数字导引,那么定向天线的初始目标捕获、 GPS 信息的抗干扰传输以及置信度分析将成为影响 目标跟踪稳定性的关键因素。目前国内普遍采用的 定向天线跟踪技术多是脉冲调制方式,缺乏数字手段 辅助导引跟踪,会带来可靠性、引导跟踪能力不够等 问题;同时,由于未采用成形技术,其瞬时带宽较大也 是普遍存在的问题之一。

本文在传统天线平台动目标跟踪体制的基础 上,将数字扩频技术<sup>[1]</sup>引入传统定向天线跟踪方 法,在不增加硬件开销的同时使系统具备一定程度 的抗干扰数据链传输能力。此外,系统将模极值跟 踪和数字导引技术有效融合,能够解决可靠性、引导 跟踪能力不够等问题。

## 2 系统技术分析

系统同步和导航业务数据的可靠接收解调是整 个系统的核心关键。通过精心设计物理层通信帧结 构,合理选用、组合 M 序列和 Walsh 序列,以及直扩 和多进制扩频技术,使链路在具备高同步增益的前 提下(保证了捕获跟踪的可靠性),同时具备了一定 的抗干扰数传能力(目前25.6 kb/s,用于传输导航 信息);此外,相对于普通扩频系统的相关处理方 法,本文提出的模极值处理方法可以在不降低相关 增益的前提下有效对抗突发干扰带来的相位模糊等 技术问题。系统原理框图与无线链路通信帧设计如 图1 所示。



Fig. 1 System block diagram and communication frame design • 616 •

首先对输入的中频信号(载频 $f_1$ )以采样率 $f_s$ 进 行带通采样,经过( $f_1$ - $n \times f_s$ )的数字混频(DDC)、低 通滤波(LPF)后得到(存在频偏和相偏的)零中频的 复基带信号,表示为

 $\left[I' \times c_i(nT_s + \tau') + jQ' \times c_q(nT_s + \tau')\right] \times e^{j2\pi(\Delta f nT_s + \Delta \varphi)}$ 

式中,含有载波频偏、相偏、PN 码偏以及由于频偏和 相偏带来的正交串扰等,其中 PN 码偏中包含信道 延迟带来的相偏以及本地采样时钟非同步带来的频 偏和相偏。

数字混频 DDC 的本地载波输入是由鉴频器输出的频差  $\Delta f$  的估计和载波同步环输出的相差  $\Delta \varphi$  的估计共同控制 NCO 产生的同步载波信号,混频器输出 I、Q 两路信号。

LPF 环节的滤波器参数应当根据发端成形(根 升余弦滤波器)设计为相应的匹配滤波器,出于 计算量的考虑以及后续抽取的方便,可以结合抗混 叠抽取滤波设计为级联的半带滤波器(HBF) 组<sup>[2]</sup>。

系统完成同步(帧同步、码同步、载波同步) 后,将高增益同步头的模极值信息输送至数字跟踪 模块用于天线捕获跟踪;同时复基带业务数据进入 模极值解调环节,经十六进制正交 Walsh 序列的模 处理解析出导航数据,用于数字导引的置信度 分析。

## 2.1 模极值跟踪技术分析

## 2.1.1 系统同步设计

系统的码同步和载波同步均围绕比例积分环路 设计,设计框图如图 2 和图 3 所示。



图 2 码同步设计框图 Fig. 2 Code synchronization design diagram

(1)



Fig. 3 Carrier synchronization design diagram

系统实现可靠的码同步和载波同步需依赖于通 信帧前端的高增益同步头,出于可靠性设计考虑,当 前系统的高增益同步头设计为 I 路和 Q 路相互正交 的两组 PN 码(PN\_I 和 PN\_Q),同步接收时将本地 PN 码与 DDC 输出的 I 路和 Q 路接收信号分别相 关、平方和,通过模值处理取得位同步信息。上述同 步设计使系统具有以下特点:

(1)采用模值处理方式能够减小残余频差和相 差对同步性能的影响(残余频差导致的相关峰值削 弱将在下面讨论);

(2)采用正交的 PN 码同步头能够有效减小多 径环境下的虚警同步概率;

(3)为使业务数据包尽可能地"拿到"抗干扰增益,工程上同步头的相关增益应设计为比业务数据的抗干扰增益大至少6 dB(考虑到相关噪声导致的性能恶化等);

(4)受载波同步环路带宽限制,接收前端应结 合 FFT 方法并根据合理的频率扫描策略设计合适 的鉴频模块。

2.1.2 影响同步接收性能的几个因素

(1)环路滤波器对同步性能的影响

载波同步环路和定时同步环路都采用了含有理 想环路滤波器的二阶二型环。理想环滤(低通)的 数学模型<sup>[3]</sup>为

$$h_{p}(s) = \frac{1 + s\tau_{2}}{s\tau_{1}} \approx \frac{1}{s\tau_{1}} + \frac{\tau_{2}}{\tau_{1}}$$
(2)

理想环滤可以等效成比例-积分因子和归一化 因子之和。理想环滤的二阶二型锁相环具有良好的 载波跟踪和窄带滤波特性,同时,其开环传递函数分 子上的附加相移(τ<sub>2</sub>的作用)引入了更大的相位裕 度,使得系统更加稳定(通过分析开环传递函数的 伯德图可知)。环路的 3 个重要参数——环路增益 G、比例因子  $\tau_2$ 和积分因子  $\tau_1$ 决定了环路的所有特 性。环路参数的选择还应当兼顾噪声特性和暂态时 间,理想的环路应当工作在弱欠阻尼状态,且暂态过 冲不超过 5%,这就要求阻尼系数  $\xi$  的经验值一般 在 0.7 左右。

(2)时差、频差对同步性能的影响

分析时差和频差对相关峰值的影响,对于精确 分析系统同步的可靠性以及鉴频环节的设计指标都 具有重要意义。图4 和图5 是通过 Matlab 对二维同 步性能恶化的建模仿真结果。



图 4 归一化时偏、频偏对相关峰值的影响 Fig. 4 The effect of time and frequency offset on correlation peak



在图 4 中,时偏以 PN 码偏的 1/N 为单位(N 为 PN 码长),频偏以原始 symbol 速率的(1/N)×1% 为 单位。由图 5 可以看出,频偏对相关峰值积累结果 有 SINC 滚降效果,此外在时域上还会引入调制。 后者的效果在当频偏较大,达到 symbol 速率 R<sub>s</sub>的 1% 以内时较为明显,如图 6 所示。





## 2.1.3 模极值跟踪策略设计

天线模极值跟踪策略设计如图 7 所示,在当前 设计的策略中,根据使用环境的不同,在扫描捕获锁 定判决环节应采用以下不同的锁定判决策略:

(1)当使用环境中多径情况比较严重时(如地 面跟踪天线),锁定策略应当以"圈扫"模极值中的 最大值位置作为初始捕获锁定位置;

(2)当使用环境中多径情况不严重,但天线平 台存在大机动情况时(如机载动中通跟踪天线),锁 定策略应当以"圈扫"模极值的加权值作为捕获门 限,过门限即锁定。



图 7 模极值跟踪策略 Fig. 7 Mold extreme tracking policy

## 2.2 数字导引跟踪技术分析

定向天线工作框图如图8所示。



图 8 天线工作框图 Fig. 8 Aerial work diagram

初始状态下,数据通道尚未建立,当完成模极值 捕获跟踪并建立数据通道后,系统对接收到的导航 信息进行自适应航迹关联置信度分析,如果导航数 据可靠,则切换至数字导引工作模式。

转入数字导引模式后,为了保证目标跟踪的可 靠性、稳定性和实时性,需要在嵌入式平台上通过矩 阵和三角运算<sup>[4]</sup>将机载导航信息转化为目标相对 位置信息。

数字导引的置信度分析保证了导引信息的可靠 性,在置信度较高时,可靠的导航信息可用于修正后 台运行的模极值跟踪模块,提升系统实时跟踪能力; 一旦发现置信度过低或不可靠,系统将自动切换到 一直在后台运行的模极值跟踪模式,从而保证了系 统的可靠稳定工作(系统帧设计保证了模极值跟踪 模式具有非常高的相关增益,失效概率远低于数字 导引,但伺服控制实时性不如数字导引模式)。

## 2.2.1 坐标变换技术

目标相对位置解算问题的本质是方位矢量由地 心极坐标系向站心极坐标系的坐标变换,在本文采用 的坐标转换方法中还用到了地心直角坐标系和站心 直角坐标系,地心极坐标系、地心直角坐标系和站心 极坐标系、站心直角坐标系的定义如图9所示。



图 9 地心极坐标系和站心极坐标系 Fig. 9 The geocentric and topocentric polar coordinates

由图9可见,上述几种坐标系的定义如下:

(1)地心直角坐标系  $X_e - Y_e - Z_e$ 与地心极坐标系  $P_e - \Phi_e - \Theta_e$ 的关系:  $X_e$ 轴指向零经度子午线,  $Y_e$ 指向 90°经度线,  $Z_e$ 是北极轴; 经度  $\Theta_e$ 是方向, 纬度  $\Phi_e$ 是 方向,  $P_e$ 是地心与本机所在点 A 的连线方向;

(2)站心直角坐标系  $X_g - Y_g - Z_g$ 与站心极坐标 系  $P_g - \Phi_g - \Theta_g$ 的关系:  $Z_g$ 是地球表面"扩张"到地面 接收天线所在点处 A 点切面的法线方向(指向太 空,注意因为地球扁率的存在,其反向延长线只有接 收天线在赤道或南北极上方时才经过地心),  $X_g - O_A - Y_g$ 平面是经过 A 点与法线  $Z_g$ 方向垂直的切面,站心 坐标系以本机所在点  $O_A$ 为原点,  $O_A - Y_g$ 轴定义为  $X_g - O_A - Y_g$ 平面内指向地心坐标系下北极轴的方向,  $O_A - X_g$ 定义为与之垂直并满足左手螺旋定则的方向。

目标飞行器的经、纬、高度信息以 m\_Lon1、m\_ Lat1 和 m\_Height1 表示,分别对应地心极坐标系下 的  $\theta_{e1}, \varphi_{e1}, \rho_{e1}(m_Height1 是气压高度,还应当加上$  $地心曲率半径);接收天线的经、纬、高度,以 m_$  $Lon0、m_Lat0 和 m_Height0 表示,分别对应地心极坐$  $标系下的 <math>\theta_{e0}, \varphi_{e0}, \rho_{e0}(m_Height0 类同)$ 。假设从接 收天线指向目标的方向矢量为 A(注意: 不是接收天线的波束方向,而是两点连线的方向矢量),则矢量<math>A在站心极坐标系  $P_g - \Phi_g - \Theta_g$ 下的三维坐标 $\rho_g, \theta_g, \varphi_g$ 就是我们的求解目的。求解出站心极坐标后,目 标相对接收天线的方位就可以确定,再通过水平维 和俯仰维的天线校准,将接收天线的波束指向与目 标对齐,完成数字导引。

下面介绍采用的坐标变换算法。

(1)由接收天线在地心极坐标系下的坐标 m\_
 Lon0、m\_Lat0 和 m\_Height0(即接收天线的经、纬、高度)计算地心直角坐标系下的坐标 X<sub>0</sub>、Y<sub>0</sub>、Z<sub>0</sub>:

$$\begin{cases} W = \sqrt{(1 - e^2 \times \sin(m\_Lat0) \times \sin(m\_Lat0))} \\ N = a/W \\ X_0 = (N + m\_Height0) \times \cos(m\_Lat0) \times \cos(m\_Lon0) \\ Y_0 = (N + m\_Height0) \times \cos(m\_Lat0) \times \sin(m\_Lon0) \\ Z_0 = (N \times (1 - e^2) + m\_Height0) \times \sin(m\_Lat0) \end{cases}$$
(3)

注意:参数 a 为地球长轴半径(赤道平面的圆 半径), W 为 WGC84 坐标系下地球的扁率, 反映地 球经度椭圆投影面的曲率,由于地球扁率的存在, 不 能简单地以地球长轴加上本机高度作为  $\rho_{el}$ 参数, 而 应当用经过曲率修正的 N 代替长轴半径 a, 在目标 的坐标转换中也存在同样问题。 (2)由目标在地心极坐标系下的坐标 m\_Lon1、
 m\_Lat1 和 m\_Height1 计算地心直角坐标系下的坐标
 X<sub>1</sub>、Y<sub>1</sub>、Z<sub>1</sub>。

(3)在直角坐标系下用目标的坐标(X<sub>1</sub>, Y<sub>1</sub>, Z<sub>1</sub>)减去接收天线的坐标(X<sub>0</sub>,Y<sub>0</sub>,Z<sub>0</sub>),得到相对位 置矢量 Ā(在"地心"直角坐标系下的坐标),相当于 将"地心"平移至接收天线所在位置 A 点处了。

(4)由矢量  $\bar{A}$  在"地心" 直角坐标系下的坐标 ( $X_1$ - $X_0$ ,  $Y_1$ - $Y_0$ ,  $Z_1$ - $Z_0$ )计算在"站心" 直角坐标系 下的坐标(x,y,z): [x=-sin(m\_Lat0)×cos(m\_Lon0)×( $X_1$ - $X_0$ )-

$$\sin(m\_Lat0) \times \sin(m\_Lon0) \times (Y_1 - Y_0) + \cos(m\_Lat0) \times (Z_1 - Z_0) y = -\sin(m\_Lon0) \times (X_1 - X_0) + \cos(m\_Lon0) \times (Y_1 - Y_0) z = \cos(m\_Lat0) \times \cos(m\_Lon0) \times (X_1 - X_0) + \cos(m\_Lat0) \times \sin(m\_Lon0) \times (Y_1 - Y_0) +$$
(4)

 $sin(m_Lat0/57.29578) \times (Z_1 - Z_0)$ 

(5)将站心直角坐标系下的坐标(x,y,z)转化 为站心极坐标系下的坐标(m\_D,m\_A,m\_E),分别 表示目标相对接收天线的距离、方位、俯仰:

$$\begin{cases} m_D = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ m_A = a \tan(y/x) \\ m_E = a \tan(z/\sqrt{x^2 + y^2}) \end{cases}$$
(5)

## 2.2.2 数字导引置信度分析技术

为保证数字导引的可靠性,需要对接收到的机 载导航数据进行置信度分析,我们采用雷达领域的 自适应航迹关联技术实现这一目标。同时简化了自 适应滤波算法,通过对观测噪声的统计数值分析将 耦合了激励与观测噪声的新息去耦,在 MSE 准则下 得到相对最优参数的增益矩阵,并进行一步线性预 测,据此进行导航信息的置信度分析。自适应滤波 可采用 Kalman 模型<sup>[5]</sup>,本文不再赘述。

## 3 结 论

本文论述的基于扩频系统的数字天线跟踪技术 相对传统天线跟踪技术在以下几个方面具备优势:

(1)抗干扰数据链传输能力方面:相对普遍采用的脉冲调制传统天线跟踪技术,本文所述关键技术具备一定程度的数据链传输能力,在不改变系统设计平台的前提下,应用软件无线电技术可使得系统抗干扰能力和数传能力进行动态重配置;

(2)数字引导能力方面:相对传统天线跟踪技术,本文所述关键技术具备数字导引能力,设计快速算法自适应航迹跟踪算法对飞机导航位置信息进行置信度分析,在建立数据链后可实现快速、精确的数字导引;

(3)可靠性方面:设计融合模极值捕获跟踪算 法和数字导引算法构成互为后台热备份的双模跟踪 技术,可以有效提高了目标捕获、跟踪的稳定性和可 靠性。

一系列信道建模仿真和飞行试验证明,相对于 传统目标跟踪技术,本文介绍的技术对系统目标跟 踪性能提升明显,系统可靠性得到进一步增强。

虽然机载、地面相控阵天线,以及数字波束合成 (DBF)和多目标跟踪技术的应用日趋广泛,但其居 高不下的使用、维护成本,增益、可靠性指标等方面 的固有插损同样是不可回避的问题,至少在最近的 若干年内,基于传统天线平台(相同增益下,相对相 控阵天线,这种固定波束天线伺服系统的成本仅为 不到五分之一)的技术创新还是有着非常广阔的应 用前景的。

本文论述的关键技术以本文第一作者参与和负 责的型号项目为背景,在试飞验证过程中运行可靠 稳定,未发现例外和难以解释问题,是经过了军航体 系使用鉴定的成熟技术,能够在不改变现有列装系 统(硬件)平台的前提下最大程度地发挥其潜在性 能,同时能够使系统可靠性得到进一步提升,具有广 阔的应用前景和重要的发展意义。

#### 参考文献:

 Proakis J G. Digital Communications [M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 524–552.

[2] 杨小牛,楼才义,徐建良.软件无线电原理与应用 [M].北京:电子工业出版社,2002.

YANG Xiao-niu,LOU Cai-yi,XU Jian-liang. Software Radio Theory and Application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2002:41-43. (in Chinese)

- [3] 张厥盛,郑继禹,万心平.锁相技术[M].西安:西安 电子科技大学出版社,1994:20-29.
  ZHANG Jue-sheng, ZHENG Ji-yu, WAN Xin-ping. Phase Lock Loop technique[M].Xi'an: Xidian University Press, 1994:20-29. (in Chinese)
- [4] 程云鹏.矩阵论[M].西安:西北工业大学出版社, 2004:26-34.
  CHENG Yun-peng. Matrix Theory[M]. Xi'an: Northwest Polytechnical University Press,2004:26-34. (in Chinese)
- [5] 陆光华,彭学愚,张林让,等.随机信号处理[M].西安:西安电子科技大学出版社,2002:48-57.
  LU Guang-hua, PENG Xue-yu, ZHANG Lin-rang, et al. Random Signal Processing[M]. Xi'an: Xidian University Press,2002:48-57. (in Chinese)

#### 作者简介:



**方** 正(1983—),男,安徽人,2008 年于 西安电子科技大学获硕士学位,现为工程师、 上海交通大学博士研究生,主要研究方向为 航空无线电信号处理;

FANG Zheng was born in Anhui Province, in 1983. He received the M. S. degree from Xidian University in 2008. He is now an engi-

neer and currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns aeronautical wireless communication signal processing.

Email:149560759@ qq. com

**丁勇飞**(1971—),男,浙江人,1999 年于西北工业大学 获硕士学位,现为研究员,主要研究方向为航空无线电系统 设计;

DING Yong-fei was born in Zhejiang Province, in 1971. He received the M. S. degree from Northwestern Polytechnical University in 1999. He is now a senior engineer of professor. His researcher concerns aeronautical radio system design.

**龚** 诚(1958—),男,广西人,1994年于英国贝尔法斯 特女王大学获博士学位,现为教授,主要研究方向为航空电 子总体设计。

GONG Cheng was born in Guangxi Zhang Autonomous Region, in 1958. He received the Ph. D. degree from the Queen's University of Belfast in 1994. He is now a professor. His research concerns avionics integrated design.