

雷达导引头速度和角度跟踪互助算法设计

郭玉霞¹, 曹旭东^{1,2}

(1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009;
2. 航空制导武器航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471009)

摘要:主动雷达导引是现代导弹的主流研究方向,而角度跟踪算法和速度跟踪算法则是主动雷达跟踪算法中的重要组成部分,其跟踪精度决定着雷达系统的制导精度。但是,当弹载雷达受到速度拖引干扰时,速度通道测量值就不再可信。为了在系统截获目标阶段,或者在目标跟踪阶段及时判断出速度拖引,文中进行了角度跟踪和速度跟踪的算法设计,解决了干扰环境下的跟踪稳定性问题,实现了算法软件在系统的验证试验,仿真及内场试验证明其算法具有可行性和有效性。

关键词:角度跟踪;速度跟踪;互助算法;抗干扰

中图分类号:TP39

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)02-0192-03

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.02.049

Interdependent Algorithm Design of Angle Tracking and Velocity Tracking for Radar Seeker

GUO Yu-xia¹, CAO Xu-dong^{1,2}

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;
2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Airborne Guided Weapons, Luoyang 471009, China)

Abstract: Active radar seeker technique has shown its mainstream status in modern tactical missile, while angle tracking and velocity tracking algorithms are important parts of radar tracking system. Tracking precision determines shoot precision. However, once radar seeker was disturbed by velocity dragging jam, the measured value of velocity channel becomes unbelievable. Therefore, in order to detect velocity dragging jam in time for system target acquisition or target tracking phase, in it, algorithm of combined interactive angle/velocity tracking was designed. Angle channel information can be processed for velocity channel information correction, the tracking stability in disruption environment can be guaranteed. Whole algorithms were implemented in intact radar seeker system, whose validity and efficiency have been proved in simulation and infield test.

Key words: angle tracking; velocity tracking; combined interactive algorithm; jam resist

0 引言

雷达导引部件是雷达型导弹的核心部件,它能搜索、截获与跟踪、从接收信号中提取跟踪数据,并计算出本身产生的控制导弹飞行的指令和信号。从总体上看,雷达导引头比驾束制导和无线电指令制导系统的弹上设备复杂,但能提供更高的制导精度。因而,在现代导弹武器系统中被广泛使用。

雷达导引部件中,角跟踪系统是其重要组成部分^[1],它通过测量导弹与目标之间的视线角速度,完成对目标的跟踪,使导弹可以准确地攻击目标,因此弹载雷达角跟踪系统在雷达型导弹攻击目标的过程中起了

非常重要的作用^[2]。

但是,弹载雷达的角跟踪系统和导弹的制导系统能达到预定的精度,其先决条件是频率跟踪系统能正常工作并达到要求的精度,故频率跟踪系统的设计以及优化,也直接影响到导弹的精度。因此,弹载雷达的速度跟踪和角跟踪系统是同样重要的,而且需要指出的是,利用速度回路和角度回路进行联合滤波,得到真实的弹目速度是相当重要的。

1 原理分析

1.1 速度跟踪回路

雷达发射电磁波信号后当遇到一个朝着雷达运动的目标时,由于多普勒效应,从这个目标返回的电磁波信号的频率将高于雷达的发射频率。因此,反射信号在雷达与目标之间往返传播之后,雷达收到的是更高

收稿日期:2012-06-24;修回日期:2012-09-26

基金项目:航空科学基金项目(20110112006)

作者简介:郭玉霞(1979-),女,河南滑县人,高级工程师,研究方向为雷达信号与信息处理、嵌入式雷达导引软件设计。

频率的电磁波信号。雷达发射和收到的电磁波频率之差就是多普勒频移,如果对多普勒频移进行测量,就可以精确地计算出雷达和目标的相对速度。如果目标远离雷达运动,则情况正好相反,目标反射的电磁波信号低于雷达发射频率^[3]。

在系统设计中,速度跟踪的功能是通过图1所示的跟踪环路来实现的。

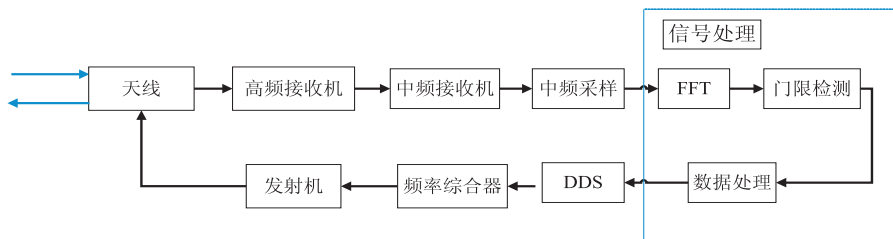


图1 速度跟踪环路示意图

1.2 角度跟踪回路

为了提高实时处理和抗干扰能力,现代雷达导引头通常采用单脉冲测角技术来获得精确的目标角位置信息,理论上可以从一个脉冲回波中得到二维角信息。

一般地,弹载雷达角跟踪回路主要包括天线、接收机、信号处理机、天线伺服系统等,主要功能是:根据目标角度指示信息实现导引系统天线角度预置,实现对目标的角度搜索与跟踪;保持天线的空间稳定,消除弹体扰动对天线指向的影响^[4]。

2 互助算法设计

2.1 应用背景

主动型雷达导弹具有发射后不用管的明显性能优势,但随着干扰技术的发展,其面临的各种干扰类型也越来越多,而其中速度拖引干扰是常用的导引头干扰技术,它严重影响空空雷达主动制导导弹的速度跟踪通道,导致其不能稳定跟踪目标,及时转入末制导状态,影响导弹的作战效能。其工作原理是:干扰机^[5]在侦收到雷达导引系统的探测信号后,首先放大和转发与目标回波具有相同多普勒频率 f_d 的干扰信号,转发的时间略大于速度跟踪电路的信号捕获时间,然后将干扰信号在频域上逐渐拖离目标回波信号,拖引的速度不大于导引系统可跟踪目标的最大速度,当拖引到一定的频距后,干扰信号突然中断,导引系统不得不在多普勒频率范围内重新搜索来截获信号(或干扰),这样就破坏了速度跟踪回路对目标信号的稳定跟踪^[6]。

从导弹自身角度看,当弹载雷达受到这种干扰^[5]时,速度通道测量值已经不再可信。因此,在上述干扰背景下,需要设计出合理的算法准确判断出速度拖引

是否存在,并及时中断速度拖引对速度跟踪的影响,正确计算出目标回波真实的多普勒频率,以重新快速截获目标回波。

2.2 坐标系的定义和转换

在确定速度跟踪和角度跟踪互助的算法模型前,由于首先要讨论跟踪坐标系与滤波状态向量的选择问题^[7],因为目标的空间位置是在一定坐标系中定义的,

在对雷达导引头角跟踪系统的研究和建模过程中,会涉及到不同坐标系之间的转换。因此,首先对坐标系进行定义并给出转换关系。

a) 地面惯性坐标系

$O_i X_i Y_i Z_i$ 。

发射点地面惯性坐标系定义为北天东坐标系,其原点在飞机质心正下方的地球表面投影点, x 轴在当地水平面内指向正北, y 轴在当地水平面内指向天向, z 轴按照右手定则确定,符号为 $O_i X_i Y_i Z_i$ 。

b) 弹体坐标系 $O X_1 Y_1 Z_1$ 。

原点 o 取在导弹质心上; ox_1 轴沿导弹纵轴向前为正; oy_1 轴在导弹纵向对称面内,垂直于 ox_1 轴,斜向上为正; oz_1 轴由右手定则确定。在载机上悬挂时,导弹呈 \times 型。

惯性坐标系 $O_i X_i Y_i Z_i$ 依次绕 Y_i 轴旋转 ψ 角,绕 Z' 轴旋转 ϑ 角,绕 x_1 轴旋转 γ 角即形成弹体坐标系 $ox_1 y_1 z_1$,角度正负符合右手定则,惯性系到弹体系的转换矩阵为:

$$T_i^1 = A_{x_1}(\gamma) A_{z'}(\vartheta) A_{y_i}(\psi) =$$

$$\begin{pmatrix} \cos \vartheta \cos \psi & \sin \vartheta & -\cos \vartheta \sin \psi \\ \sin \psi \sin \gamma - \sin \vartheta \cos \psi \cos \gamma & \cos \vartheta \cos \gamma & \cos \psi \sin \gamma + \sin \vartheta \sin \psi \cos \gamma \\ \sin \psi \cos \gamma + \sin \vartheta \cos \psi \sin \gamma & -\cos \vartheta \sin \gamma & \cos \psi \cos \gamma - \sin \vartheta \sin \psi \sin \gamma \end{pmatrix} \quad (1)$$

c) 天线坐标系。

天线坐标系初始位置与弹体坐标系一致,原点位于天线的旋转中心,天线波束方向为 x 轴方向,向前为正。

弹体坐标系经下述旋转可得到天线坐标系:首先绕弹体系 oz_1 轴旋转 φ_z 角,后绕 oy_2 轴旋转 φ_y 角,此时 ox_2 轴为天线波束的实际指向,即天线波束的等强信号线方向。

2.3 互助算法

存在干扰时,导引头测量的导弹目标接近速度是不准确的,但可以利用角度测量值来检测此类干扰。因此,在系统设计中,速度滤波^[8]和角度滤波^[9,10]需要同时进行。对速度欺骗干扰的判别可以通过速度变化率和加速度变化率获得,无论是否发现分析带宽内的多个目标,均保持对当前跟踪目标的滤波处理,若滤波

输出的速度与加速度值与用作对比的参考速度加速度存在超门限差异,也可以认为当前系统已被速度拖引干扰拖跑。

首先确认天线坐标系 OX_aYaZ_a 为处理的主坐标系;设导弹弹体保持匀速直线运动,运动方向定义为弹体坐标系 $OX_1Y_1Z_1$ 的 X_1 轴正向,速度为 v_M ;目标为可变方向匀速运动,速度的绝对值为 v_T 。天线坐标系与弹体坐标系的关系如图 2 所示。

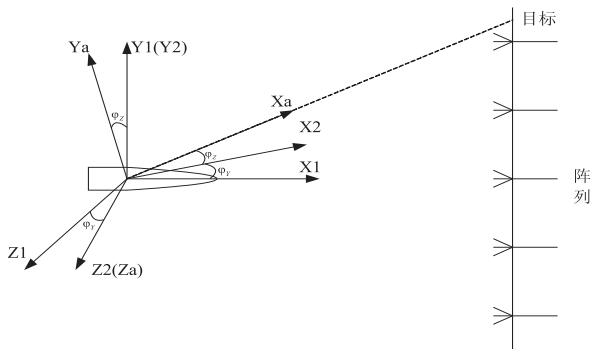


图 2 坐标转换示意图

弹载雷达在信号检测过程中,对目标回波实时处理,通过角跟踪回路和速度跟踪回路,可以得到弹载雷达角度指向值 φ_y 、 φ_z ,失调角测量值 δ_y 、 δ_z ,弹目相对速度测量值 v_x 。再分别对框架角和失调角分别进行滤波,同时对弹目相对径向速度测量值进行滤波计算,这样通过对角度回路和速度回路的同时滤波可以得到真实的目标速度。如果速度跟踪已被干扰,重新进行速度搜索,否则继续进行跟踪。流程图见图 3。

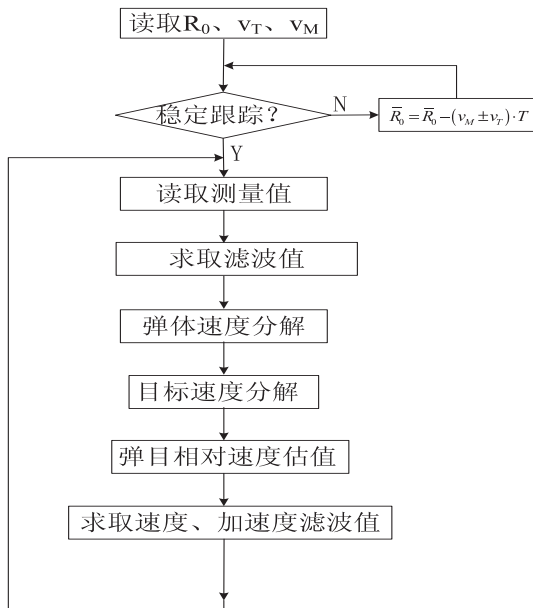


图 3 角度互助算法流程图

3 算法实现及验证

为研究弹载雷达速度跟踪性能,验证速度和角度

互助算法设计的可行性,在信号处理机平台上设计和编写了 DSP 软件,DSP 芯片类型为 ADI 公司的 Tiger-Sharc TS101^[11,12],它是 ADI 公司生产的一款高性能浮点数字信号处理器。最高主频可达 300MHz,处理器内部采用了多条分开的总线,使用多级流水线方式工作,因此具有很高的数据吞吐率和很高的执行速度。同时,采用浮点运算可以不必担心运算溢出的问题,具有较高的运算精度,十分适合雷达导引处理场合采用。

针对该工程,设计了模拟试验环境如下:

首先通过微波暗室模拟弹载雷达实际工作空间,然后由目标环境与干扰信号源为弹载雷达提供一个模拟的包含目标多普勒信息的回波信号,以及产生拖引干扰的干扰信号源。总控台负责加电和控制,目标喇叭安装在一个导轨上,通过信号源控制计算机可以以一定角速度进行运动。数据采集处理计算机可以与信号处理机 DSP 进行通信,负责程序加载和调试,并能读取试验中的数据进行分析。

当验证角度和速度跟踪互助的算法设计时,需要施加速度拖引干扰。在产品加电后,总控台通过光纤网将弹目距离和相对速度传送给信号和干扰模拟器,信号和干扰模拟器根据雷达方程按 4 次方的距离因子向产品辐射等效的射频信号,在满足干扰加入的条件后,根据干扰的类型、干扰参数及干信比按 2 次方的距离因子辐射等效的干扰信号,此过程一直进行到一定距离为止。

在跟踪过程中,同时启动速度滤波和角度滤波,当存在速度拖引时,则速度测量值受到拖引的影响,频率被逐渐拉偏,偏离真实的目标频率,因此利用测量值进行的速度滤波也逐渐偏离正确的速度值,利用滤波输出的速度与加速度值与用作对比的参考速度加速度进行门限对比。就能判断出是否存在速度拖引,并且能及时中断对拖引信号的跟踪,返回到正确的频率位置,重新进行速度跟踪。

4 结束语

文中介绍了主动雷达导引头中速度跟踪的原理和速度跟踪算法,并结合具体的工程项目,分析和设计了速度跟踪和角度跟踪联合的跟踪算法,当存在拖引干扰时,完成了干扰的判断和干扰识别,分析并实现了跟踪回路的软件模块,完成了 DSP 软件的编写,同时设计了试验方法,并通过试验验证了算法设计的有效性。

参考文献:

[1] Deming R W, Schindler J, Perlovsky L I. Multi-target Multi-sensor tracking using only range and Doppler measurements

(下转第 198 页)

288,每秒中的图片帧数为 10 帧,实测网络流量达到了 120Kb/s 左右;第二种方案,设置视频分辨率为 352×288,每秒中的视频帧数为 10 帧,其实测网络流量为 40Kb/s 左右。两种方案都能够实现视频监控。然而两种方案的数据流量存有一定的差异,分析其原因,JPEG 是一种静止图像的压缩标准,它是一种标准的帧内压缩编码方式,而 H264 采用的是 DPCM 加变换编码的混合编码模式,它除了帧内压缩编码外还能实现帧间压缩编码^[13]。因此,第二种方案较第一种方案有着更高的压缩比和更小的数据量。



图 4 测试现场图

4 结束语

随着“无线城市”概念的提出,3G、WIFI 等无线网络覆盖范围变得越加广泛,数据传输速率实现了质的飞跃,为移动视频监控方案的实现提供了可行性。文中提出的基于 Android 智能终端的移动视频监控系统,弥补了传统网络视频监控互联网接入困难、监控设备非可移动性等各方面的缺点。消费者可以随时随地将手机等智能终端通过 3G、WIFI 无线网络接入互联

网访问视频服务器或其他智能终端实现移动视频监控。因此,以 Android 智能终端为平台实现移动视频监控有着广阔的市场前景。

参考文献:

- [1] 郑磊. 基于嵌入式 Linux 的网络视频监控系统研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2009.
- [2] 余腊生,刘勇. 基于网络的智能视频监控系统设计与实现[J]. 计算机工程与技术,2009,30(16):3879-3882.
- [3] 常志沛. 基于 Android 的智能手机视频监控系统的设计与实现[D]. 大连:大连海事大学,2011.
- [4] 付少华,付红桥,王政. 基于 3G 网络的手机移动视频监控系统的的设计[J]. 计算机应用,2011,31(1):70-72.
- [5] 曹晓芳,王超,李杰. 一种基于 Android 智能手机的远程视频监控的设计[J]. 电子器件,2011,34(6):709-712.
- [6] 徐世强,赵霁,牛泽民. 基于 GPRS 的远程视频监控系统的的设计与应用[J]. 计算机技术与发展,2010,20(12):150-153.
- [7] 余荣发. 基于 Android 的移动视频监控系统的的设计与实现[D]. 广州:华南理工大学,2011.
- [8] 王志强,张铁君,孙莹. 适用于无线城市建设的宽带接入技术[J]. 网络安全技术应用,2010(4):50-52.
- [9] 郭宏志. Android 应用开发详解[M]. 北京:电子工业出版社,2010.
- [10] 余志龙,王世江. Google Android SDK 开发范例大全[M]. 北京:人民邮电出版社,2010.
- [11] ISO/IEC14496-12, ISO base media file format [S/OL]. 2008. <http://www.iso.org/>.
- [12] 胡聪,周甜,唐璐丹. 基于 FFMPEG 的跨平台视频编解码研究[J]. 武汉理工大学学报,2011,33(11):139-142.
- [13] 毕厚杰. 新一代视频压缩编码标准-H. 264/AVC[M]. 北京:人民邮电出版社,2005.

(上接第 194 页)

- [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems,2009, 45 (8):593-611.
- [2] 李保国,赵宏钟,付强. 毫米波频率步进单脉冲雷达角跟踪技术研究[J]. 电光与控制,2006,23(1):46-53.
- [3] 苟勇刚,皮亦鸣,曹宗杰. 机载脉冲多普勒雷达单目标跟踪系统仿真[J]. 中国电子研究院学报,2009,19(2):19-34.
- [4] 吴兆欣. 空导导弹雷达导引系统设计[M]. 北京:国防工业出版社,2006:213-214.
- [5] 黄成家,刘晓东. 机载 PD 雷达速度波门拖引干扰建模与评估[J]. 海军工程大学学报,2010,9(4):174-198.
- [6] Greco M, Gini F, Farina A, et al. Effect of phase and range gate pull-off delay quantization on jammer signal[J]. IEEE Proc. Radar Sonar Navig,2006,11(5):454-459.
- [7] Doucet A, Godaill S. On sequential Monte Carlo methods for Bayesian filtering[J]. Statistics and Computing,2000,7(10): 197-208.
- [8] 吴涛,汪立新,林孝焰. 改进扩展卡尔曼滤波器对机动目标的跟踪定位[C]//中国通讯协会第五届学术年会论文集. 出版地不详;出版者不详,2008:874-878.
- [9] 巫春玲,韩崇昭. 用于弹道目标跟踪的有限差分扩展卡尔曼滤波算法[J]. 西安交通大学学报,2008,17(2):124-129.
- [10] Arulampalam M S, Maskell S. A tutorial on partical filters for online nonlinear/non-gaussian Bayesian tracking [J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2002,23(5):174-188.
- [11] Analog Devices Inc. VisualDSP++ 4.5 Compiler and Library Manual for TigerSHARC Processors[M]. Norwood MA USA: Analog Devices Inc.,2006:321-328.
- [12] Analog Devices Inc. TigerSHARC DSP 硬件指南[M]. Norwood MA USA: Analog Devices Inc.,2006:245-256.