

目标运动对步进频率毫米波雷达锥扫测角的影响研究

沈 吉¹, 向锦武¹, 祁载康², 胡江平³

(1. 北京航空航天大学飞机设计研究所, 北京 100083; 2. 北京理工大学机电控制工程系, 北京 100081;
3. 河南辉煌科技股份有限公司, 河南郑州 450001)

摘 要: 本文首先介绍了圆锥扫描体制雷达系统测角的基本原理, 针对小口径高距离分辨步进频率毫米波雷达导引头引入了用一维距离像测量目标方位角度的投影法, 并以投影法为基础, 用计算机仿真分析了实际系统中多普勒效应对测角的影响, 最后给出了圆锥扫描体制雷达导引头的实验结果。

关键词: 步进频率; 一维距离像; 圆锥扫描

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 06-0987-03

A Study of the Target's Motion Influence on Angular Measurement of Conical Scanning System in Stepped Frequency MMW Radar

SHEN Ji¹, XIANG Jir-wu¹, QI Zai-kang², Hu Jiang-ping³

(1. Institute of Aircraft Design, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;
2. School of Mechanor Electronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. Henan Splendor Science and Technology Joint-stock Co. LTD, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: This paper firstly introduces the basic principle of the angular measurement between boresight and LOS (the line of sight) of conical scanning system, and the method of angular measurement using one dimensional range profile for small size MMW seeker of High Range Resolution stepped frequency radar is presented. Secondly, the influence of Doppler effect on the angular measurement is analyzed. Finally, some experimental results are given.

Key words: stepped frequency; one dimensional range profile; conical scanning

1 引言

对于导引头来说, 它的功能就是发现、识别并跟踪目标, 最后导引弹药精确打击。因而作为导引头探测器的雷达, 一方面从回波信号中提取特征信息, 发现和识别目标; 另一方面, 它还要从回波信号中获得方位信息, 通过处理准确地给出目标在给定坐标系中的方位, 为跟踪和打击提供精确的数据^[1]。

在圆锥扫描体制下, 雷达测角的基本原理是利用天线旋转一周获得的信号幅值分布来确定目标的方位^[2]。对于高分辨步进频率毫米波雷达, 测角信号采用的是—维距离像(如图1)。在

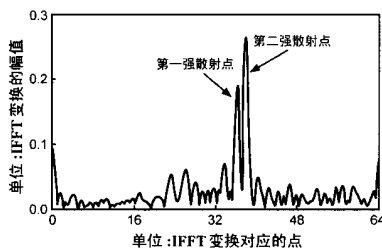


图1 实际卡车的一维距离像

这种体制的雷达系统中, 由于目标运动引起的目标姿态变化会使得—维距离像幅值变化剧烈; 同时引起的多普勒效应也

会使得能量发散对—维距离像产生不利影响。因此, 要使该体制雷达及其测角方法真正地应用到导引头系统, 必须深入研究这些不利因素的影响, 从而寻求解决问题的方法。

2 步进频率毫米波雷达锥扫测角

2.1 锥扫测角原理^[2,5]

如图2是雷达天线圆锥扫描的示意图。图中, θ_s 是天线电轴(boresight)与天线机械轴之间的夹角; $P = P_0 \exp(-w \cdot \theta_s^2)$ 是波瓣功率; P_0 是波瓣功率系数; w 是半功率角系数。

根据雷达系统理论, 锥扫测角就是根据天线旋转一周获得的 N_m 个有效测角信号 $U_j (j = 1 \sim N_m)$ 的幅值分布得到目标在给定坐标系中的方位误差角, 关系式如下:

目标与天线机械轴(导引头轴)之间的夹角 θ 为

$$\theta = \frac{1}{2w} \ln\left(\frac{U_{max}}{U_{min}}\right) \quad (1)$$

目标在给定坐标系(x, y)中的方位角 α 为

$$\alpha = \arctan\left(\frac{U_y}{U_x}\right) \quad (2)$$

转换到直角坐标系下, 其误差角的形式是

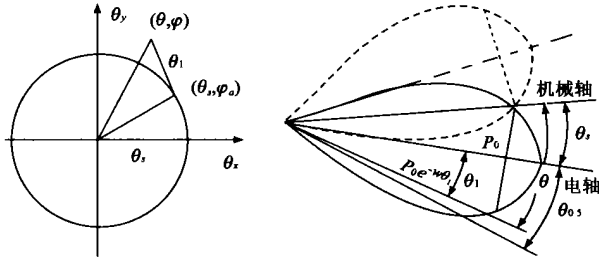


图2 雷达天线圆锥扫描的示意图

$$x = \cos \quad y = \sin \quad (3)$$

其中, U_{\max} 和 U_{\min} 分别是回波信号最大和最小幅值; x 和 y 是直角坐标系下的目标角误差形式.

从理论上讲, 由于目标回波信号幅度 U_j 作周期性变化, 利用式(1)和(2), 就可以得到误差角 θ 和 φ . 但这只是理想状态, 就是说只有当 $U_j (j=1 \sim N_m)$ 的分布是平滑包络曲线或者至少能够拟合出一个平滑的包络曲线时, 可以得到比较准确的角度误差值. 而在高分辨步进频率体制下, 天线旋转一周能提取的一维距离像的数目 N_m 有限 (本文模拟系统中 $N_m=9$), 根本无法拟合出一个平滑的包络曲线. 同时, 由于目标的一维距离像对目标姿态变化比较敏感, 如果仍然沿用前述算法提取角误差, 其精度势必会大大降低, 甚至于根本就无法测出角度误差. 因此, 必须另辟它径.

2.2 投影法简介^[3]

投影法认为: 目标的回波幅值在水平和垂直两个方向上的投影在其值不大时, 近似正比于导引头输出角误差 x 和 y , 即可以认为:

$$\tilde{x} = \arctg\left(\frac{-y}{x}\right) \quad (4)$$

$$\tilde{y} = \sqrt{(x)^2 + (y)^2} \quad (5)$$

其中:

$$x = k \frac{\sum_{j=0}^{N_m-1} U_j \cos j(t)}{\sum_{j=0}^{N_m-1} |U_j \cos j(t)|} \quad (6)$$

$$y = k \frac{\sum_{j=0}^{N_m-1} U_j \sin j(t)}{\sum_{j=0}^{N_m-1} |U_j \sin j(t)|} \quad (7)$$

这里, U_j 是第 j 个回波的峰值; $j(t)$ 是天线电轴在坐标系 (x, y) 中转过的角度; k 是比例系数. 采用一维距离像 $|H_l|$ 的峰值作为测角信号, 则有:

$$x = k \frac{\sum_{j=0}^{N_m-1} \left(\max_{0 \leq l \leq N-1} |H_l| \right)_j \cos j(t)}{\sum_{j=0}^{N_m-1} \left(\max_{0 \leq l \leq N-1} |H_l| \right)_j \cos j(t)} \quad (8)$$

$$y = k \frac{\sum_{j=0}^{N_m-1} \left(\max_{0 \leq l \leq N-1} |H_l| \right)_j \sin j(t)}{\sum_{j=0}^{N_m-1} \left(\max_{0 \leq l \leq N-1} |H_l| \right)_j \sin j(t)} \quad (9)$$

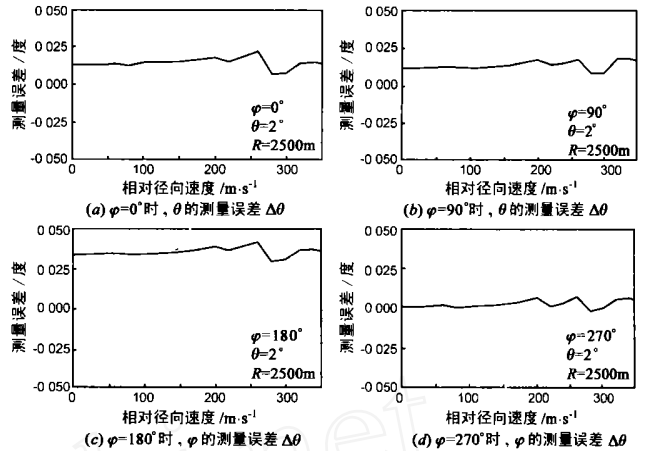


图3 运动速度对角度 θ 的测角误差曲线

其中, N 是一个周期内雷达跳频的次数.

投影法已证明对于静止目标是可行的^[3], 下面来模拟研究当目标运动时的情形.

3 目标运动对测角的影响模拟分析

雷达锥扫描测角分静止目标测角和运动目标测角两种, 把静止目标看作运动目标的一个特例. 在通常情况下, 由于种种因素, 被攻击目标与导引头之间存在着难以补偿的相对运动, 其法向(径向)分量产生多普勒效应, 从而引起 IFFT 中的距离-速度耦合现象, 导致信号能量发散; 切向(横向)分量相当于目标姿态变化, 导致一维距离像幅值变化剧烈. 所有这些会使一维距离像发生严重畸变, 影响到对目标方位的测量, 最终可能导致导引头丢失目标.

由于目标切向(横向)运动分量导致的目标姿态变化使一维距离像幅值变化非常复杂, 其规律有待进一步研究, 所以下面模拟的只是径向运动对测角影响的变化曲线图.

如图3是目标运动速度对 θ 测角影响的变化曲线图, 共有四组图, 分别是 θ 的测量误差 $\Delta\theta = (\tilde{\theta} - \theta)$ 变化曲线, 对应目标在坐标系 (x, y) 四个方向. 图中有关参数分别是: 目标与导引头轴的夹角 $\theta = 2^\circ$; 目标在给定坐标系 (x, y) 中的方位角 $\varphi = 60^\circ$; 弹目径向距离 $R = 2500\text{m}$; IFFT 的变换步长 $0.2^{[4]}$.

从图3可以看出, 随着速度的增大, 对目标与天线机械轴(导引头轴)之间夹角 θ 的测量影响不大, 误差 $\Delta\theta$ 在 $0 \sim 0.05^\circ$ 之间变化; 当速度小于 200m/s 时, 误差变化比较稳定.

如图4是目标运动速度对 φ 测角影响的变化曲线图, 也有四组图, 分别是 φ 的测量误差 $\Delta\varphi = (\tilde{\varphi} - \varphi)$ 变化曲线, 对应目标在坐标系 (x, y) 四个方向. 图中有关参数同上.

从图4可以看出, 随着速度的增大, 目标在给定坐标系 (x, y) 中的方位角 φ 的测量误差 $\Delta\varphi$ 则随着速度的增加而呈周期性变化, 其变化在 $-2^\circ \sim 4^\circ$ 之间. 当速度小于 50m/s 时, 误差变化比较稳定, 小于 0.4° . 从工程的角度讲, 运动速度的补偿误差不会大于 40m/s , 所以该方法用于导引头系统是可行的, 符合实际工程应用要求.

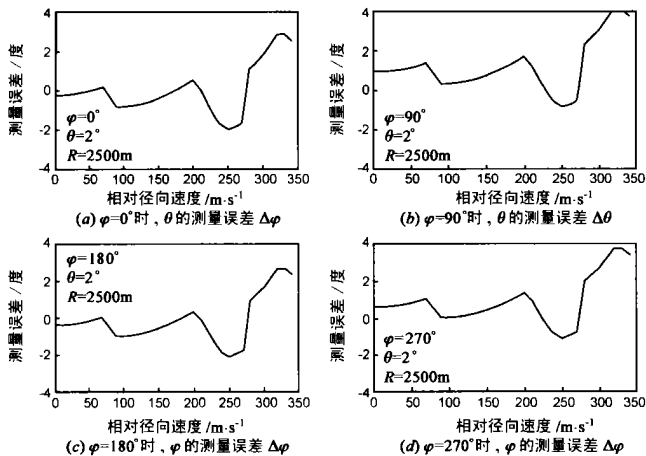


图 4 运动速度对角度 的测角误差曲线

4 实验验证

图 5 是某小口径高距离分辨步进频率毫米波导引头跟踪卡车的一段角度误差曲线。卡车的起始距离为 200m,速度为 50km/h。其中,图 5(a)是卡车沿着径向运动的测量误差曲线,图 5(b)是卡车沿着和径向有一定角度(大约 75°)运动的测量误差曲线。可以看出,方位角误差和俯仰角误差基本上在 0 附近进行波动。对于图 5(b)来说,其误差的波动的幅度要大些,

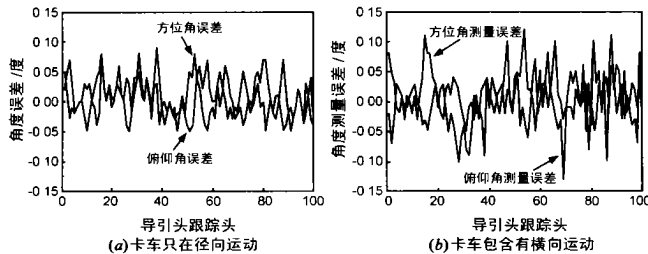


图 5 卡车尾部锥扫测角(50km/h)

最大值大概在 0.12 左右。不过无论哪种情况,其误差的最大值都远远地小于上述模拟分析的 0.4°。说明导引头系统工作正常,跟踪并锁定了目标。

5 结束语

圆锥扫描体制雷达,由于其结构简单,工程上易于实现,尤其是结合高分辨步进频率体制,对于要求小口径、小体积、小重量的毫米波导引头来说非常实用。但是作为一种新的体制雷达,还有许多关键技术需要突破。目前,该体制导引头正在尝试应用于一些导引头系统。

参考文献:

[1] P. Granell. Guided Weapon Control Systems [M]. USA: Pergamon Press,1980. 1 - 26.
 [2] 丁鹭飞. 雷达原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1995: 197 - 204.
 [3] 杨军,等. 毫米波步进频率目标识别获取位标器角误差信号的方法——电压法[J]. 弹箭与制导学报,2001,21(3):21 - 23.
 [4] 沈吉,等. IFFT 步长对步进频率毫米波导引头动目标辨识的影响研究[J]. 弹箭与制导学报,2001,21(4):21 - 26.
 [5] 沈吉. 耐高过载主动毫米波/被动双色红外亚成像复合导引头总体技术研究[D]. 北京:北京理工大学,2001.

作者简介:

沈 吉 男,1961 年 11 月生于河南省沁阳市,2001 年 7 月毕业于北京理工大学机电控制学院飞行器设计专业,获博士学位,现在北京航空航天大学博士后流动站工作,目前正参加一项国家“十五”重点预研项目和多项兵器工业总公司的预研课题,主要从事飞行器总体设计技术、计算机控制技术以及毫米波雷达信号处理技术的研究工作。

向锦武 男,1964 年 4 月生于湖南省平江县,北京航空航天大学飞行器设计学科教授、博士生导师,主要从事飞行器总体设计技术、信号处理技术的研究工作。