

基于调频连续波的运动平台测高补偿算法研究

王李波¹ 吴卫山^{1,2}

WANG Libo WU Weishan

摘要

调频连续波雷达根据发射和接收线性调频信号的差拍频率计算目标高度,具有发射峰值功率小、硬件成本低和信号处理简单等优点,是当前高度表最常采用的一种测高波形。但当测高雷达相对地面运动,距离延时对应差拍频率和目标运动多普勒存在耦合时,直接将回波多普勒前沿检测结果作为差拍频率计算平台高度会存在较大偏差。通过对运动雷达发射调频连续波信号的回波信号进行数学建模,分析运动目标多普勒频率和距离延时对应差拍频率之间的耦合关系,给出一种改进的运动目标高度解算方法,并推导出解析表达式。通过数值仿真,对比采用补偿方法的前后运动目标测高结果,说明所提出方法的有效性。

关键词

测高雷达; 调频连续波; 频率前沿检测; 距离多普勒耦合; 距离矫正

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.02.027

0 引言

距离地面高度是描述空中目标状态的重要信息,目前常用的高度表雷达通常采用窄脉冲工作体制或调频连续波工作体制。窄脉冲测高雷达具有测量范围大等优点^[1-4],但对低空目标的测高精度较差且硬件成本昂贵。调频连续波测高雷达具有平均发射功率小、硬件成本低廉和信号处理简单等优点^[5-7],在军用和民用多个领域得到广泛应用。

调频连续波测高雷达通过发射和接收线性调频连续波信号,根据发射信号和接收信号的差拍频率计算目标回波延时,根据目标高度对应回波延时最小的先验信息,采用频率前沿检测获得目标相对地面的高度信息^[8-10]。精确测量地面回波差拍频率是实现高精度测高的基础,空中静止目标和地面之间没有相对运动,回波信号差拍频率可以准确反映目标高度对应的延时信息,不需要进行多普勒补偿就可以实现精确测高。空中目标通常具有一定速度,此时回波信号差拍频率包含高度延时信息和多普勒信息,获取目标高度信息前需要对多普勒频率进行补偿^[11-15]。

运动目标测高雷达常用垂线方向多普勒进行补偿,当测高雷达波束较宽,主波束照射地面回波场景较大,直接采用高度多普勒频率补偿会导致较大测高误差。本文首先对调频连续波的回波频率进行理论分析和数学推导,建立运动目标回波多普勒频率和距离延时差拍频率之间的耦合关系,并给

出一种改进的运动目标多普勒补偿方法,通过数值仿真给出补偿前后的测高结果,并对包括目标高度、速度大小和速度方向等因素的影响进行对比分析,说明本文提出方法的适用范围和有效性。

1 调频连续波测高原理

调频连续波测高雷达发射线性调频连续波信号,发射信号经地面反射延时进入接收机,接收路本振信号采用与发射信号调制斜率相同的调频连续波信号,经过去斜处理得到与距离延时线性相关的单频信号。对去斜后的单频信号进行FFT(快速傅里叶变换)处理和前沿检测^[16-20],根据频率与延时关系可以准确计算出目标的高度信息,其中发射波形和接收波形频率随时间的变化关系如图1所示。

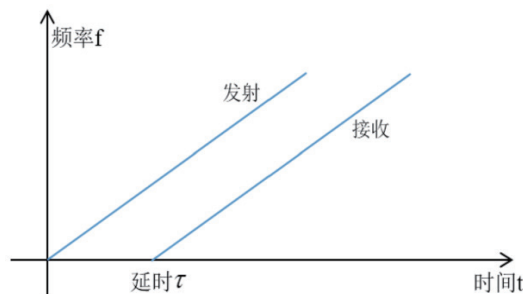


图1 调频连续波发射和接收信号示意图

距离雷达 R 处目标的回波延时 $\tau=2R/c$,调频连续波发射信号和接收回波之间的差拍频率^[21-24]为:

$$\Delta f = K\tau = K \frac{2R}{c} \quad (1)$$

式中: Δf 表示差拍频率, K 表示线性调频信号调制斜率, R

1. 中国空空导弹研究院 河南洛阳 471009

2. 空基信息感知与融合全国重点实验室 河南洛阳 471009

表示目标距离, c 表示光速。差拍频率通过发射和接收信号去斜后的单频信号检测获得, 调频连续波去斜可以采用模拟去斜或者数字去斜, 大带宽信号可以采用模拟去斜减小后续数据采样率和信号处理压力, 数字去斜相对灵活, 可以方便处理带宽较小的场景。去斜后通过测量差拍频率计算目标和雷达间距为:

$$R = \frac{c\Delta f}{2K} \quad (2)$$

从上式可以看出, 测量信号延时对应的差拍频率是测距的关键。针对连续地面测高场景, 目标高度为到地面的最短距离, 对应差拍频率最小, 采用频率前沿检测结果作为目标高度差拍频率是当前常用的处理方法, 计算高度信息的表达式为:

$$H = \frac{cf_b}{2K} \quad (3)$$

式中: f_b 表示频域检测到目标高度对应的差拍频率, H 表示目标距离地面高度测量结果。

上述频率前沿检测目标高度测量方法中, 假设差拍频率与测高雷达到地面的距离成正比, 而运动目标不同方向的地面回波会叠加不同多普勒频率, 此时频率前沿检测对应的回波不一定来自目标垂直地面方向, 需要对运动多普勒频率补偿后进行目标高度测量。

目前调频连续波对运动目标的多普勒频率补偿主要采用高度方向的速度投影多普勒, 该方法在测高波束较窄只考虑高度方向地面回波时精度较高。但较窄波束需要较大的雷达天线阵面尺寸, 而空中测高雷达受空间限制, 雷达波束较宽, 照射范围内的地面回波都会进入雷达接收机, 不同方向地面回波叠加不同的多普勒频率, 此时采用单一的高度方向回波多普勒频率补偿会出现问题, 需要对运动目标多普勒频率补偿公式进行修正。

2 运动目标改进测高算法

目标高度方向回波信号差拍频率准确检测是获取运动目标高度的关键, 由于目标和地面不同位置间相对运动产生的多普勒频率不同, 导致频率前沿并不对应目标正下方高度的差拍频率, 需要进行运动多普勒补偿后计算目标高度信息, 下文通过运动目标回波模型建立进行理论推导。

图 2 给出一般性的目标飞行态势二维图, 三维运动场景可以采用相同方法求解, 并将三维场景按照目标高度和速度方向选择二维平面简化求解过程。其中 H 表示目标距离地面高度、 V 表示目标速度大小、 θ_v 表示目标速度方向和高度夹角、 θ 表示地面任意点 P 与高度方向的夹角, P 点回波相对发射信号的多普勒频率差为:

$$F_d(\theta) = -K \frac{2H}{\cos\theta \cdot c} + \frac{2V \cos(\theta_v - \theta)}{\lambda} \quad (4)$$

式中: λ 表示载频波长, 第一项表示地面任意点 P 和测高雷达间距离延时导致的差拍频率, 为雷达测高需要的频率; 第二项表示地面 P 点和测高雷达间相对运动产生的多普勒频率, 雷达测高前需要补偿该项, 否则高度方向回波差拍频率和多普勒频率耦合将严重影响目标高度的准确测量。

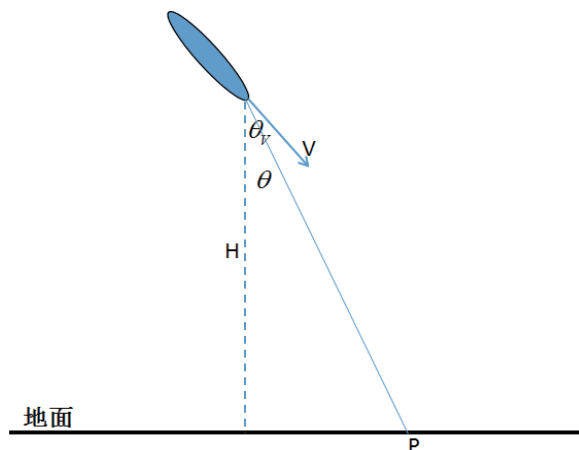


图 2 测高场景示意图

根据式 (4) 可知, 如果目标相对地面静止, 测高雷达相对地面垂直点处距离最小, 回波对应的差拍频率最大, 可以根据相应的频率检测结果计算目标高度。当目标相对地面运动, 回波信号叠加多普勒频率时, 距离延时频率和多普勒频率互相耦合, 需要对测距公式进行修正。以下给出根据频率前沿计算目标高度的理论推导过程。

对回波差拍频率公式 (4) 关于角度求一阶导数, 公式为:

$$F'_d(\theta) = -K \frac{2H \sin\theta}{\cos^2\theta \cdot c} + \frac{2V \sin(\theta_v - \theta)}{\lambda} \quad (5)$$

回波差拍频率依然采用前沿检测, 对应式 (5) 一阶倒数等于 0, 变换后结果可以表示为:

$$A \tan\theta \cdot \sec\theta = \sin(\theta_v - \theta) \quad (6)$$

式中: $A = \frac{KH\lambda}{cV}$ 。

将上式关于角度 θ 进行一阶泰勒级数展开, 得到前沿频率对应的角度表达式为:

$$\hat{\theta} = \frac{\sin\theta_v}{A + \cos\theta_v} \quad (7)$$

将上述 $\hat{\theta}$ 带入测量的频率前沿即可得到目标高度。

$$\hat{H} = \frac{\left(\frac{2V \cos(\theta_v - \hat{\theta})}{\lambda} - F_d \right) \cos\hat{\theta} \cdot c}{2K} \quad (8)$$

式中: $\hat{H}$ 表示目标高度检测结果, 其他参数定义同上, 测高需要的所有信息均可以通过频率检测或目标传感器提供。

采用式 (8) 解析表达式可以快速计算出目标的高度信息, 基本不需要额外计算开支。但公式推导过程中需要用到目标高度信息 H , 而该信息正是采用调频连续波测量的信息, 需

要对高度值进行估计。

实际应用中可以设置一个粗略高度作为初值,代入式(8)给出的改进测高公式进行迭代,通常经过5次迭代就可以收敛到比较精确的测高结果,或者设置测高误差门限,当相邻两帧测高迭代误差小于门限时停止高度迭代,并将此时的高度估计值作为最终的目标高度输出。

3 数值仿真结果

从测高公式(8)可以看出,测高结果主要与目标速度大小、速度方向和目标高度相关,本节分别对上述3个影响参数进行仿真分析。仿真波形参数如表1所示,其中载频为15 GHz、调频连续波周期为1 ms、调频带宽为100 MHz。

表1 调频连续波仿真参数

参数	数值
载频	15 GHz
调频周期	1 ms
调频带宽	100 MHz

3.1 目标高度对测高的影响

为了验证目标高度对运动多普勒补偿前后测高结果的影响,设定目标速度为200 m/s、平飞,目标高度在100~1000 m范围内均匀变化,通过数值仿真给出不同目标高度情况下,多普勒频率补偿前后测高误差随目标高度的分布。

从图3仿真结果可以看出,高度方向差拍频率受到目标运动多普勒频率的耦合影响,多普勒频率补偿前测高误差随目标高度增加而减小,但测高误差整体较大,而采用本文补偿算法后的测高误差明显减小。

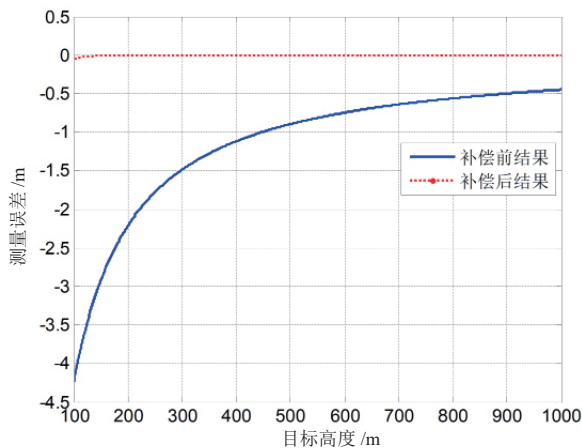


图3 目标高度对测高误差的影响

通过对不同高度目标的仿真结果可以看出,本文补偿算法对不同目标高度的测高精度均明显改善。

3.2 目标速度大小对测高的影响

为了验证目标速度大小对多普勒补偿前后测高结果的影

响,设定目标高度为200 m、目标速度水平、目标速度大小从20 m/s均匀增加到200 m/s。通过数值仿真给出不同目标速度情况下,多普勒频率补偿前后测高误差随目标速度大小的分布。

从图4仿真结果可以看出,高度方向差拍频率受到目标运动多普勒频率的耦合影响,多普勒频率补偿前测高误差随目标高度增加而增大,测高误差整体较大,而采用本文补偿算法后的测高误差明显减小。

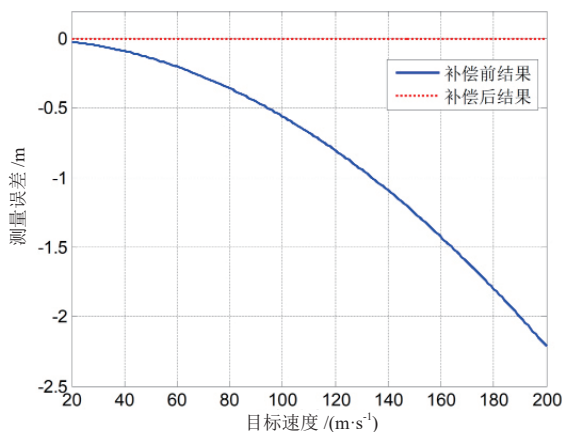


图4 目标速度大小对测高误差的影响

通过对目标不同速度大小的仿真结果可以看出,本文补偿算法对不同目标速度的测高精度均明显改善。

3.3 目标速度方向对测高的影响

为了验证目标速度方向对多普勒补偿前后测高结果的影响,设定目标高度为200 m、速度大小为200 m/s,目标速度方向和高度夹角从10°均匀增加到90°。通过数值仿真给出不同目标速度方向情况下,多普勒频率补偿前后测高误差随目标速度方向的分布。

从图5仿真结果可以看出,由于目标速度在高度方向投影随目标速度和高度夹角的增加而减小,多普勒频率补偿前测高误差随目标和高度夹角增加而减小,但测高误差整体较大,而采用本文补偿算法后的测高误差明显减小。

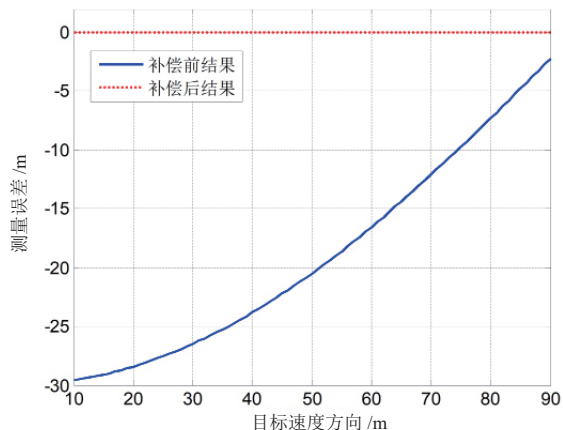


图5 目标速度方向对测高误差的影响

通过对不同速度方向目标的仿真结果可以看出,本文补偿算法对不同目标速度方向的测高精度均明显改善。

综上,本节通过数值仿真,分别对目标高度、速度大小和速度方向三个因素对测高精度的影响进行分析。仿真结果表明,在不同运动场景下,采用本文给出的测高方法均可以明显改善测高精度。

4 结语

针对调频连续波测高雷达,本文通过理论推导出目标运动产生回波多普勒频率与距离延时差拍频率之间的耦合关系,并采用一级泰勒级数线性近似给出改进的目标高度计算解析表达式。通过数值仿真对比,说明本文补偿算法在目标不同高度、不同速度大小和方向情况下,均可以显著提高测高精度,具有一定的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 全英汇,方文,高霞,等.捷变频雷达导引头技术现状与发展趋势[J].航空兵器,2021,28(3):1-9.
- [2] 张红旗,李晓,沈欣.基于Simulink的LFMCW引信仿真[J].航空兵器,2020,27(2):53-58.
- [3] 史林,张琳.调频连续波雷达频谱配对信号处理方法[J].西安电子科技大学学报,2003(4):534-538.
- [4] 陈伟民,李存龙.基于微波雷达的位移/距离测量技术[J].电子测量与仪器学报,2015,29(9):1251-1265.
- [5] 刘贵喜,凌文杰,杨万海.线性调频连续波雷达多目标分辨的新方法[J].电波科学学报,2006,21(1):79-83.
- [6] 张红,王晓红,郭昕.提高线性调频连续波雷达测距精度的ZFFT算法[J].航天电子对抗,2006,22(1):48-51.
- [7] 雒海潮,宋思盛.线性调频连续波雷达的一种信号处理方法[J].现代电子技术,2010,33(5):42-43.
- [8] 吴礼,彭树生,肖泽龙,等.一种LFMCW雷达距离速度去耦合方法[J].现代雷达,2008(11):44-47.
- [9] 何培宇,黄骏,李任科,等.基于LFMCW雷达的低空突防飞机高精度测高算法[J].系统工程与电子技术,2011,33(1):53-57.
- [10] 刘上,朱国富,王玲,等.LFMCW雷达高精度测距相位差改进算法[J].雷达科学与技术,2021,19(3):287-291+297.
- [11] 谭朔,郭伟.调频连续波近程测距系统研究[J].舰船电子工程,2007,27(4):95-99.
- [12] 梁毅,周峰,邢孟道,等.采用调频连续波的高速运动目标检测方法[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2008,35(4):586-591.
- [13] 潘勇先,朱子平.调频连续波雷达距离-速度配对方法[J].山西电子技术,2012(1):57-59.
- [14] 北京航空航天大学.一种线性调频连续波雷达高度表的数字化处理方法:201210166779.5[P].2012-10-03.
- [15] 季铭,梁勇,吴泽旭.调频连续波高度表的数据滤波处理方法[J].通讯世界,2016(6):9.
- [16] YANG J Y. MTD and range-velocity ddcoupling of LFMCW radar[J].Journal of electronics and information technology, 2004, 26(2): 169-173.
- [17] EKER T, DEMIR D, HIZAL A, et al. Exploitation of linear frequency modulated continuous waveform (LFMCW) for frequency diverse arrays[J].IEEE transactions on antennas & propagation, 2013,61(7):3546-3553.
- [18] 杨建宇.LFMCW雷达信号模糊函数分析[J].信号处理,2002,18(1):39-42.
- [19] DU Y M, YANG J Y. Novel method of moving target detection and parameter estimation for LFMCW radar[J].Chinese journal of radio science, 2005(3):1985-1988.
- [20] MUÑOZ-FERRERAS J. Helicopter classification with a high resolution lfmcw radar[J].IEEE transactions on aerospace & electronic systems, 2009,45(4):1373-1384.
- [21] 冀振元,孟宪德,王吉滨.高频雷达中LFMCW信号的分析[J].系统工程与电子技术,1999,21(12):14-16+49.
- [22] 陈祝明,丁义元,向敬成.采用Chirp-Z变换提高LFMCW雷达的测距精度[J].信号处理,2002,18(2):110-112+106.
- [23] 王月鹏,赵国庆.二维FFT算法在LFMCW雷达信号处理中的应用及其性能分析[J].电子科技,2005(5):25-28+32.
- [24] WANG G C, MUNOZ-FERRERAS J M, GU C G, et al. Application of linear-frequency-modulated continuous-wave (LFMCW) radars for tracking of vital signs[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2014,62(6):1387-1399.

【作者简介】

王李波(1989—),男,河南新乡人,硕士研究生,工程师,研究方向:雷达信号与信息处理。

吴卫山(1968—),男,河南洛阳人,硕士研究生,研究员,研究方向:雷达系统设计。

(收稿日期:2023-12-05)