

一种鲁棒性雷达高度计跟踪算法的研究

王志森, 姜景山

(中国科学院空间中心国家'863微波遥感实验室, 北京 100080)

摘 要: 过去的星载高度计主要以海洋应用为主,其常用的跟踪算法一般主要适用于特定情况的海洋环境,但现在随着遥感应用的普及,对于陆地、海冰等不同复杂环境的观测日益成为高度计工作的重点,它要求高度计跟踪算法对环境的变化具有很强的鲁棒性,而这是那些以海洋应用为主的跟踪算法所不具备的。为此,本文在分析以往跟踪算法不足的基础上,从建立与分析一般意义上高度计回波模型的角度出发,以 OCOG(offset center of gravity)算法为研究重点,通过理论分析与仿真实验,证明了该算法作为鲁棒型跟踪算法的可行性和优越性,同时讨论了它的缺点。这在很大程度上解决了以往应用中对 OCOG算法理论性分析不足造成的概念模糊问题,为以 OCOG算法为基础的高度计鲁棒性跟踪算法的深入研究与应用打下了坚实基础。

关键词: 雷达高度计; 鲁棒性; 跟踪; 算法

中图分类号: TN959.2

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2003) 03-0341-04

Research on a Robust Radar Altimeter Tracking Algorithm

WANG Zhi-sen, JIANG Jing-shan

(National '863 'Microwave Remote Sensing Laboratory, Center for Space Science and Applied Research, CAS, Beijing 100080)

Abstract: To meet the new higher requirements from remote sensing development, radar altimeter is being extended to more challenging applications, such as land survey and sea ice survey. So, radar altimeter must be adaptive to complex environments and one of the keys is how to build a kind of robust tracking algorithm, which is quite different from those for ocean applications. In the context, as a basis of studying robust tracking algorithm, following general analysis of radar altimeter echo, OCOG algorithm will be introduced. Through theoretical analysis and emulation test, OCOG is justified to be an excellent robust tracking algorithm for radar altimeter, and its shortcomings is also discussed. Thus it may help the following advanced studies on robust radar altimeter tracking algorithm design.

Key words: altimeter; robust; tracking; algorithm

1 引言

雷达高度计^[4,5]是一种搭载于飞机、卫星等飞行器上的测高雷达,可用来实时测量雷达至目标面的平均高度、目标起伏特性及后向散射系数等参量。对于机载或星载高度计而言通常采用脉冲高度计,它的基本工作原理是:以一种或多种的脉冲重复频率向目标面发射脉冲(通常是调制后的压缩脉冲),经目标面反射后,由雷达接收机接收回波,根据某种跟踪算法,计算出发射脉冲时刻与回波跟踪点接收时刻的差值、AGC控制值和目标面某种意义下的起伏度等参量,最终达到测量目的,其中回波跟踪算法是高度计的核心环节。

做为一种微波遥感成像方式,雷达高度计工作时受气候、天气和昼夜的影响远小于光学仪器,具有近乎全天候、全天时快速成像的特点,它在海洋观测、海洋地球物理学和气象研究、极地研究、海洋预报与开发等方面具有重要的应用价值。

随着空间探测技术的迅速发展,高度计在功能、频段、测量精度等方面都发生了深刻的变化,从二十世纪七十年代初到现在不到三十年的时间里,其发展已经历了四代。为满足不断增长的诸如大范围三维成像等新的需求,兼顾海洋和陆地等目标环境的观测要求,必须发展新一代高度计技术,即第五代高度计,而其要面临的一个关键问题就是如何建立满足上述要求的跟踪算法。当前典型的高度计回波跟踪算法有波门门限法^[4]、波门分裂法^[1,3]、最大似然法^[2]几种基本类型,但由于跟踪精度或对环境适应能力的问题,它们都不能满足上述要求。重心偏离法(OCOG)^[4,6]则是在有关文献中作为一种经验公式被提出的,其实用价值正逐渐被人们所重视,它的优点是在对诸如海冰、雪原之类变化不定的目标环境观测过程中表现出了很强的适应性,很少发生失锁现象,但缺点在于跟踪准确度较差,而且缺乏原理性解释和性能方面的详细分析,不利于其更深入的改进和应用。

收稿日期:2001-11-21;修回日期:2002-08-20

在本文中,我们将通过对 OCOG 算法的基本原理、鲁棒性和有效性的理论分析,以及仿真实验结果的分析,来验证该算法的性能和可行性,同时针对 OCOG 算法的不足,提出建立鲁棒性高度计跟踪算法的思路。

2 通用型高度计回波模型的建立

我们首先建立点目标回波响应的基本表达式和雷达高度计的空间观测示意图(如图 1 所示),然后在此基础上建立起伏目标面的回波响应表达式,最后分析其回波波形分布的特点。

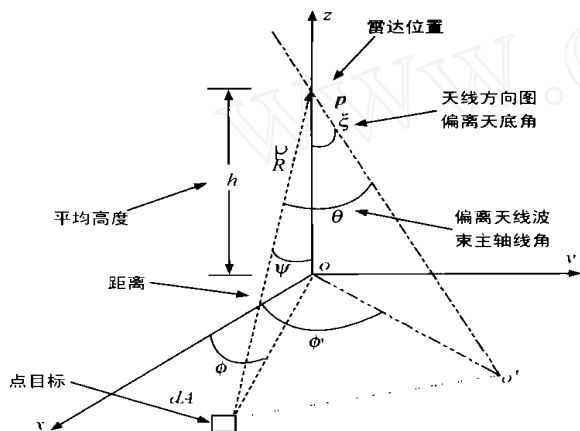


图 1 高度计观测空间示意图

我们参见高度计空间观测关系如图 1 所示,建立一般情况下的起伏目标面回波响应过程如下所示:

$$P(t) = \iint_{\Omega} f_1(t - (x, y, h(x, y))) f_2(x, y, h(x, y)) dx dy \quad (1)$$

其中: $P(t)$ 为回波响应, Ω 为波束照射目标区。

$f_1(\tau) = \delta(\tau)$, $(x, y, h(x, y)) = \frac{2}{c} \sqrt{x^2 + y^2 + h(x, y)^2}$ 决定回波的延时刻。

$$f_2(\tau) = \frac{2}{(4)^3} \cdot \frac{G^2(x, y, h, 0) \cdot (x, y, h)}{r^4(x, y, h)}$$

决定回波的强度。

对于高度计而言,雷达照射区内的目标面几何外形可视为一平坦面上叠加某种起伏而成,在雷达观测姿态一定而且目标面起伏度远小于雷达相对目标面距离的情况下,高度计回波可表示为该平坦目标面回波响应与一延时分布函数的卷积形式,具体推导过程如下:

$$p(t) = \iint_{\Omega} f_1(t - (x, y, H) - (x, y)) f_2(x, y, H) dx dy \quad (2)$$

设 Ω 为平坦目标面雷达照射区,则如果 $h \ll H$,考虑到高度计天线波束锐化分布的特点,可认为 Ω 就有:

$$p(t) = \int_{\min}^{\max} f_c(\tau) P_{FS}(t - \tau) d\tau \quad (3)$$

式中: P_{FS} 是平均高度 H 对应的平坦目标面回波响应, $f_c(\tau)$ 为目标面起伏度特征函数;由于 $f_1(\tau) = \delta(\tau)$,它只影响 $p(t)$

的能量分布,而不会改变其总能量,即:

$$\int_{\min}^{\max} f_c(\tau) d\tau = 1 \quad (4)$$

整理上述结果,可以得到新型高度计回波模型及其特征分析如下:

$$p(t) = \int_{\min}^{\max} f_c(\tau) P_{FS}(t - \tau) d\tau \quad (5)$$

其中, $p(t)$ 是起伏目标面的回波响应; $P_{FS}(t)$ 是平均平坦表面回波响应; $f_c(\tau)$ 是目标面起伏度特征函数,它具有如下特征:

- (1) 全部积分约为 1;
- (2) 分布范围为: $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$, 由主波束内目标相对雷达的距离范围决定;
- (3) 与目标面高程分布一般情况下不存在一一对应关系,不同高程分布可以对应同一目标面起伏度特征函数,这造成了高程测量的模糊问题;
- (4) 当天底偏离角足够小时, $f_c(\tau)$ 可近似为照射区目标面高程概率密度分布函数。

3 鲁棒性跟踪算法的基本思想与 OCOG 算法

在建立需要面向复杂环境和不同观测模式(如天线偏离天底点观测方式)的高度计回波跟踪算法时,关键在于避免高度计实时跟踪时发生回波失锁,要实时跟踪高度计回波波形在时域内的位置变化情况,这就要求跟踪算法在距离跟踪方面具有较好的鲁棒性,即估计的结果、性能指标等方面对于特定形式的干扰(如目标面的起伏、散射系数的变化)表现出足够的敏感性,这也是本文研究的重点。因此,我们在建立高度计跟踪算法时,必须提取一般意义下高度计回波的特征量来建立误差跟踪方程,同时尽量保证其对跟踪量之外的因素变化不敏感,这样建立的跟踪算法才能满足鲁棒性方面的要求。前面提到的高度计回波模型表明,一般情况的高度计平均回波功率波形可主要由目标面平均平坦表面回波响应和起伏度特征函数二者的卷积式(式(5))来表示,而起伏度特征函数主要只影响回波能量的时域分布,基本上并不改变其总能量,因此当起伏度特征函数的分布范围远小于平均平坦表面回波响应的分布范围时,回波响应的波形将主要由后者决定。因此我们可通过着重分析平均平坦表面回波响应来提取建立跟踪方程的特征量。对于一般情况下的平坦目标面而言,回波波形的轮廓可用一单峰状凸函数表示,这体现出了回波能量分布的一般特点,如果我们能根据其特点实现对该回波轮廓的

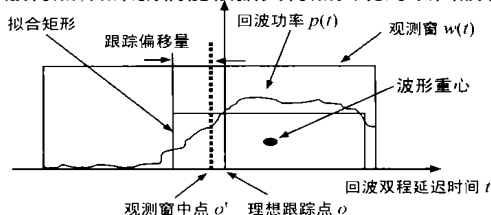


图 2 OCOG 算法矩形拟合示意图

跟踪,就可避免失锁现象的发生,从而实现对整个高度计回波的鲁棒性跟踪,关键是如何准确地描述这个轮廓,较为常用的方法是拟合法,即将其简化为便于分析的等效波形或闭合函数形式。

OCOG(重心偏离法)算法^[4]就是体现上述思想的一种跟踪高度计跟踪算法。通过上述对高度计回波模型的分析我们可以看出,它的基本思想是认为高度计回波的主要能量分布可以用一等效矩形来描述,拟合的原则是该矩形与跟踪窗内的回波段有相同的面积和重心,而矩形前沿则与回波能量分布区总体呈上升趋势的回波前沿部分相对应,通过跟踪该等效矩形前沿位置的变化就可获得高度计回波波形在时域内的位置变化,实现距离误差的跟踪。同时根据该等效矩形的高度变化还可以了解回波功率的强弱变化情况,实现系统前端的 ACC 跟踪。OCOG 算法的基本实现步骤如下:

(1) 根据第 N 次估计结果确定跟踪窗的位置,求取第 $N+1$ 次测量时回波在跟踪窗内的重心点和等效回波功率幅值。

(2) 以跟踪窗内回波面积除以等效回波功率幅值,获得待拟合矩形的宽度。

(3) 令拟合矩形与跟踪窗内回波的重心重合,根据前面求得的矩形宽度,即可获得矩形前沿在跟踪窗内的位置。

(4) 拟合矩形前沿与跟踪窗中心的时间差,就是第 N 次估计的误差。

4 OCOG 算法的性能分析

为进一步了解 OCOG 算法的在实际应用中的可行性,我们将首先计算 OCOG 估计子的统计特征,然后通过不同环境条件下的仿真实验来检验 OCOG 算法的跟踪性能,最后对估计子的有效性和鲁棒性进行分析。

4.1 OCOG 估计子的均值与方差

我们设 OCOG 的跟踪稳定方程为:

$$g(p(t), \hat{\tau}_0) = C_g(p(t), \hat{\tau}_0) - 0.5 \cdot W_e(p(t), \hat{\tau}_0) = 0 \quad (6)$$

其中: C_g 和 W_e 分别为拟合矩形的重心和等效宽度, $\hat{\tau}_0$ 为对跟踪延时(0 时刻)的估值。对 $g(p(t), \hat{\tau}_0)$ 围绕 $\hat{\tau}_0$ 进行 Taylor 级数展开可得:

$$g(p(t), \hat{\tau}) = g(p(t), \hat{\tau}_0) + \left. \frac{\partial g(p(t), \hat{\tau})}{\partial \hat{\tau}} \right|_{\hat{\tau}=\hat{\tau}_0} (\hat{\tau} - \hat{\tau}_0) + 0.5 \left. \frac{\partial^2 g(p(t), \hat{\tau})}{\partial \hat{\tau}^2} \right|_{\hat{\tau}=\hat{\tau}_0} (\hat{\tau} - \hat{\tau}_0)^2 + o((\hat{\tau} - \hat{\tau}_0)^2)$$

我们假定 $g(p(t), \hat{\tau})$ 与 $\hat{\tau}_0$ 互不相关,则 $\hat{\tau}_0$ 相对理想跟踪点的均值偏差 μ 和方差 σ^2 为:

$$\begin{cases} \mu = E[\hat{\tau}_0] = E \left\{ \left. \frac{\partial g(p(t), \hat{\tau})}{\partial \hat{\tau}} \right|_{\hat{\tau}=\hat{\tau}_0} = 0 \right\} \\ \sigma^2 = E[(\hat{\tau}_0 - \mu)^2] = E \left\{ \left. \frac{\partial^2 g(p(t), \hat{\tau})}{\partial \hat{\tau}^2} \right|_{\hat{\tau}=\hat{\tau}_0} = 0 \right\} \end{cases}$$

4.2 仿真实验结果

为了进一步评估 OCOG 算法的跟踪性能,我们将通过仿真实验来进行验证。利用前面的回波模型,通过仿真获得代表不同目标环境和工作模式下统计平均意义下的高度计回波波形,并设定理想跟踪点为高度计相对目标面的平均高度双倍程延时,然后利用 OCOG 算法进行模拟回波跟踪,最终获得其对应的跟踪误差关系曲线。基本实验参量设置如下:平均高度:5000 米;天线:圆对称高斯方向图,半功率角为 3°;时间:;分辨率:1ns;天线波束偏离天底角(off-nadir angle):2°和 20°。

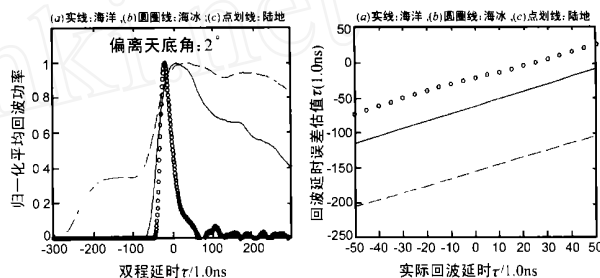


图 3 近天底点观测时的回波跟踪特性曲线

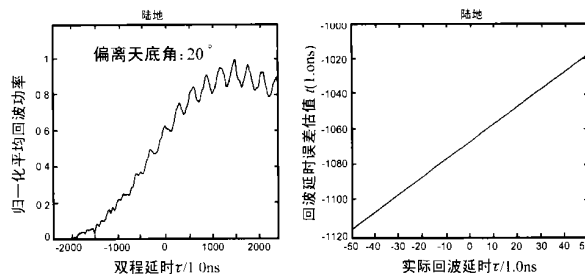


图 4 远天底点观测时的回波跟踪特性曲线

4.3 OCOG 算法的性能分析

通过对式(7)的分析可以推断出,它们的变化规律主要由反映回波整体能量分布缓变过程的各低阶模低阶矩量决定的。首先,OCOG 估计子的均值偏差一般情况不为 0。其次,根据前面对高度计回波模型的分析,高度计回波能量分布的低阶矩量主要由平坦目标面回波响应决定,一般可认为平坦目标面回波响应是缓变的,那么观测窗内回波低阶模低阶矩量也应是连续缓变的,因此 OCOG 估计子的均值偏差和方差在观测环境变化时,也应是连续缓变的。根据上述分析我们可以确定,OCOG 估计子属于一种有偏估计,在一般情况下波动较为连续缓慢,不会出现剧烈变化,因此 OCOG 估计子具有较强的鲁棒性。

做为上述结论的证明,仿真实验的结果也进一步表明,OCOG 算法在不同模拟环境条件下的误差跟踪曲线,在很大范围内均体现出了良好的线性特征,即 OCOG 算法只要简单处理(如设定该曲线做近似线性变化时的比例系数)可以很容易地计算得针对回波跟踪点的预测误差的动态变化,实现对高度计回波的鲁棒性跟踪。但是实验结果也进一步表明,OCOG 算法的估计值相对真实值存在一定偏差,是一种有偏估计。

5 结论

综合上述分析,OCOG算法的基本思想是,利用代表窗内回波能量分布的低阶特征量建立跟踪误差估计子,对跟踪点位置等参量的变化情况进行跟踪.该算法的优点是,对目标回波模型的依赖很低,有很大的线性跟踪动态范围,体现了很强的鲁棒性.但是 OCOG算法的缺点在于,它的估计子是一种有偏估计,其绝对偏差值与目标环境、观测方式等多种因素有关,跟踪的绝对精度较差.因此,OCOG算法比较适于做高度计的实时粗跟踪算法,可以极大改善高度计对不同环境的适应能力,但精度方面则因为只考虑回波模型的一般情况,只能获得存在相当大模糊度的回波轮廓描述,精度方面自然无法保证,因此必须将 OCOG算法与其它方法相结合,才能建立高精度的鲁棒性高度计跟踪算法.

参考文献:

- [1] Gray S Brown. The average impulse response of a rough surface and its applications [J]. IEEE Trans on Antenna and Propagation, 1977, AP-25(1): 67 - 74.
- [2] GLivrini, L Borgarelli, G Picardi. The ERS-1 RA Tracking Algorithms [Z]. Italy Rome: Info and Com Dept of La Sapienza University, 1992.
- [3] J Robert Jensen. Radar altimeter gate tracking: Theory and extension [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(2): 651 - 657.
- [4] David Mantripp. Radar Altimeter [M]. U S: Mullard Space Science

Laboratory, 1991.

- [5] 乌拉比(F T ulaby), 冯建超, 等. 微波遥感[M]. 北京: 北京科学出版社, 1987.
- [6] 张云华, 许可. 中国国防科学技术报告: 星载三维成像高度计关键技术[R]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2001.

作者简介:



王志森 男, 1973 年 6 月生于山东莱钢, 中国科学院空间中心微波遥感部 1998 级博士生, 主要从事国家'863'新型微波遥感器“成像高度计”有关高度计回波跟踪算法等关键技术研究, 博士期间共发表文章 5 篇.



姜景山 男, 1936 年生于吉林省, 中国工程院院士, 微波遥感及航天应用工程专家, 博士生导师, 现任国家 863 航空航天领域专家委员会顾问、国家载人航天多模态微波遥感器主任设计师、中国空间科学学会副理事长兼遥感专业委员会副主任、国际 COSPAR 中国委员会委员、国际欧亚科学院院士等多项职务, 他主持的工程和研究项目曾获得国家、院、部级特等、一等和二等奖励十余项, 发表论文 100 余篇, 现在, 姜景山院士正从事将我国微波遥感成果应用于气象、海洋卫星和月球探测的研究工作.