

# 基于准最大似然估计的星载海洋雷达高度计跟踪器的实现及机载试验验证

许 可, 刘和光

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080)

**摘 要:** 在轨实时跟踪处理是海洋雷达高度计的关键环节, 本文系统地研究了应用于海洋雷达高度计跟踪器的最大似然估计算法的原理、算法误差分析、以及  $\Delta B$  滤波器的工作机理. 在此基础上研制了基于准最大似然算法的星载海洋雷达高度计跟踪器, 该跟踪器在机载飞行试验中获得了成功, 在国内首次获得了基于准最大似然算法的海洋回波曲线, 为我国星载海洋雷达高度计的发展奠定了重要的基础.

**关键词:** 雷达高度计; 最大似然估计算法; 跟踪器

**中图分类号:** TN953      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2004) 06-0922-04

## The Realization and Airborne Flight Experiment Verification for the Tracker of the Spaceborne Ocean Radar Altimeter Based on Sub-Optimal Maximum Likelihood Estimation

XU Ke, LIU He-guang

(Center for Space Science and Applied Research, CAS, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Real-time tracking plays a key roll for ocean radar altimeter (RA). In this paper, the maximum likelihood estimation (MLE) algorithm for RA is studied, including the scheme, the errors, and the realization. The  $\Delta B$  filter is also analyzed. A tracker for spaceborne RA based on sub-optimal maximum likelihood estimation (SMLE) was developed, and by which a lot of ocean echo signal curves were obtained successfully in the airborne flight experiment. This was the first time for China to obtain ocean echo signal curves based on SMLE, and it was a great step for China to develop spaceborne RA.

**Key words:** radar altimeter; maximum likelihood estimation algorithm; tracker

### 1 引言

海洋雷达高度计是一种主动式微波传感器, 它可以对全球海洋作精确的测量, 其直接测量的产品是卫星到海面的高度、海面有效波高和海面向后散射系数. 星载海洋雷达高度计的发展只不过三十几年, 但其研究和应用几乎遍布了与海洋高度有关的一切领域. 通过对高度计测量数据的进一步反演, 可以确定大地水准面及地表重力异常; 对全球大洋环流及变异, 海洋的中尺度变化进行观测与分析研究; 可以测量全球海平面的变化、反演海面风速、进行海面波浪场分析和预报; 另外还可以监测海冰和极区冰层变化<sup>[1,2]</sup>等.

根据 Brown 在 1977 年的研究, 证明了海面作为一个粗糙的散射表面, 高度计平均返回波形用三项的卷积表示<sup>[3]</sup>:

$$W(t) = P_{FS}(t) * q_s(t) * P_C(t) \quad (1)$$

式中:  $W(t)$  是接收回波的平均功率(图 1(d) 所示);  $P_{FS}(t)$  是平坦海面平均脉冲响应函数(图 1(c) 所示);  $q_s(t)$  是海面镜

像点概率密度函数(图 1(b) 所示);  $P_C(t)$  是雷达系统点目标响应函数(图 1(a) 所示). 当  $p_r(t)$  和  $q_s(t)$  为高斯分布时, 得出海面回波波形为:

$$W(t) = \begin{cases} P_T P_{FS}(0) \sqrt{2PR_c} \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{t}{\sqrt{2R_c}}\right) \right] / 2, & (t < 0) \\ P_T P_{FS}(t) \sqrt{2PR_c} \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{t}{\sqrt{2R_c}}\right) \right] / 2, & (t \geq 0) \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $R_c = [R_r^2 + (2R/c)^2]^{1/2}$

这里  $G$  是脉冲压缩率,  $P_T$  是发射脉冲峰值功率,  $c$  是光速,  $R_r$  为点目标响应的 3dB 时宽,  $R_c$  是海面镜像点均方根(rms)高度. 海洋回波的卷积过程如图 1 所示, 其中横轴代表时间, 纵轴代表功率.

在图 1(d) 的波形中, 包含有高度计所要测量的 3 个参量(高度、有效波高和海面向后散射系数)<sup>[4]</sup>. 由于该回波波形是叠加有海面回波噪声和仪器噪声的<sup>[5]</sup>, 并且对应脉冲压缩后

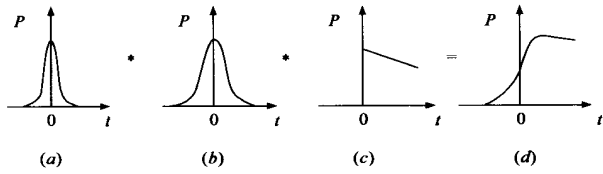


图 1 海面回波卷积过程示意图

的时宽一般在 200ns 以内,高度计依靠跟踪处理确保海面回波波形始终位于距离窗内,同时获得 3 个测量参量<sup>[6]</sup>,所以跟踪处理是雷达高度计工作的核心.在设计高度计跟踪器的时候,一方面要考虑跟踪精度的要求,另一方面要考虑跟踪器的健壮性.

本文重点研究与回波模型有关的最大似然跟踪算法,对似然算法的原理、精度和实现方法进行了深入的研究,研制了基于准最大似然算法的星载海洋雷达高度计跟踪器.该跟踪器在机载飞行试验中获得了成功,在国内首次获得了基于准最大似然算法的海洋回波曲线,为我国星载海洋雷达高度计的发展奠定了重要的基础.

## 2 最大似然跟踪算法的原理

雷达高度计在海洋测量的时候,首先向海面发射一个 chirp 信号,海面的回波信号经过全去斜坡和检波后,就得到如图 1(d)所示的回波波形<sup>[4]</sup>.由于这个波形叠加有噪声,采用最大似然估计的方法来提取其中的高度、有效波高和海面后向散射系数.根据文献[7]的扩展面目标的衰落统计特征,采样后的回波波形  $V_i$  具有如下的统计特性:

- (a) 波形采样值之间是相互独立的;
- (b) 波形采样的概率密度函数  $P_i(V_i)$  为:

$$P_i(V_i) = \frac{1}{V_i} \exp(-\frac{V_i}{V_i}) \quad (3)$$

其中  $V_i$  表示第  $i$  号滤波器的波形采样值,  $V_i$  表示波形采样值  $V_i$  的期望值,只要连续的波形采样是独立的,就可以通过平均的方法来减小均方差,以降低测量误差,所以构造最大似然函数如下:

$$P(V_{11}, V_{12}, \dots, V_{ik} / S_0, R^0, R_h) = \prod_{i,k} \frac{1}{V_i} \exp(-V_{ik}/V_i) \quad (4)$$

这里,  $V_{ik}$  是第  $i$  个滤波器的第  $k$  个脉冲的波形采样值,  $V_i$  是第  $i$  个滤波器的期望值,  $S_0$  是对应高度值的待估参量,  $R^0$  是后向散射系数的待估参量,  $R_h$  是均方根波高的待估参量<sup>[8]</sup>.

根据最大似然估计处理的定义,如果在三个参量  $S_0, R^0$  及  $R_h$  一定的条件下,使得联合概率密度函数值最大,对应的  $S_0, R^0$  及  $R_h$  即是参量  $S_0, R^0$  和  $R_h$  的最大似然估计值.由此可见,MLE 要满足三个等式的要求:

$$0 = \frac{\partial \ln P}{\partial S_0} = - \sum_k \sum_i (V_i - V_{ik}) V_i^{-2} \frac{V_i}{S_0} \quad (5)$$

这里  $\ln P$  代表三个参量  $S_0, R^0$  和  $R_h$ , 确定这三个参量的值要解这个方程,具体实现这个技术的方法是将等式(5)中的偏导数的负数做为积分反馈滤波器的输入,形成负反馈,进而使

$\frac{\partial \ln P}{\partial S_0} \rightarrow 0$ , 其实现框图如图 2 所示,从中可以得到:

$$\begin{aligned} \frac{dS_0}{dt} &= - \frac{kS_0 \ln P}{5S_0} \\ \frac{dR^0}{dt} &= - \frac{kS_0 \ln P}{5R^0} \\ \frac{dR_h}{dt} &= - \frac{kS_0 \ln P}{5R_h} \end{aligned} \quad (6)$$

这里  $k$  是积分器的增益因子,这样最大似然估计算法的时间变化率为:

$$\frac{d \ln P}{dt} = \left( \frac{5 \ln P}{5S_0} \right) \frac{dS_0}{dt} + \left( \frac{5 \ln P}{5R^0} \right) \frac{dR^0}{dt} + \left( \frac{5 \ln P}{5R_h} \right) \frac{dR_h}{dt} \quad (7)$$

将式(6)代入(7),可以得到:

$$\frac{d \ln P}{dt} = - k \left\{ \left( \frac{5 \ln P}{5S_0} \right)^2 + \left( \frac{5 \ln P}{5R^0} \right)^2 + \left( \frac{5 \ln P}{5R_h} \right)^2 \right\} F_0 \quad (8)$$

这样,作为时间函数的最大似然函数是收敛的,如果初始的参数接近于正确值,则图 2 所示系统将收敛于  $S_0, R^0$  和  $R_h$  的联合最大似然估计值.

实现图 2 所示的最大似然估计处理单元如图 3 所示,其中波高统计及参量加权表产生估计的波形采样均值和

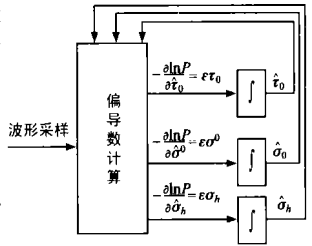


图 2 MLE 实现框图

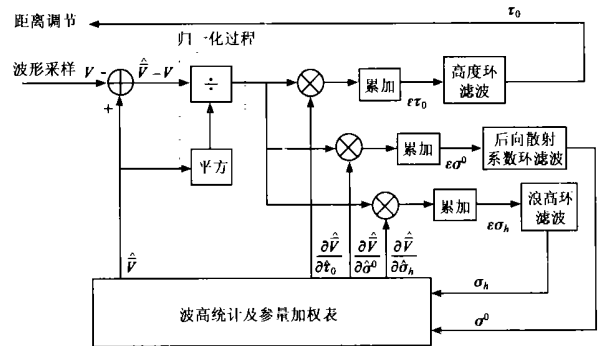


图 3 最大似然估计处理单元框图

三个加权窗函数.海面平均回波波形的曲线如图 4 所示,最大似然估计的加权函数如图 5 ~ 7 所示,其中实线为最大似然估计窗,虚线为将最大似然估计简化的准最大似然估计窗.

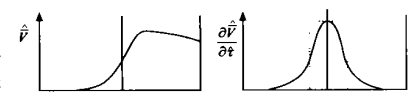


图 4 平均回波波形

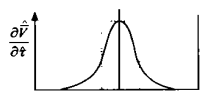


图 5 高度加权窗

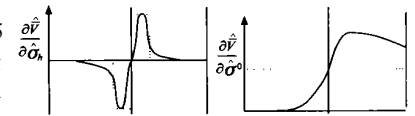


图 6 浪高加权窗

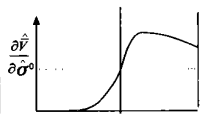


图 7 自动增益加权窗

## 3 最大似然估计的误差分析

### 3.1 最大似然估计的渐进无偏性分析

由式(4)可知,高度计最大似然跟踪的似然函数为:

$$P(V_{11}, V_{12}, \dots, V_{nk} / S_0, R_0, R_h) = \prod_{i,k} \frac{1}{V_i} \exp(-V_{ik}/V_i) \quad (9)$$

为了分析方便, 设定上式中  $k = 1$ , 即只对一个回波信号加以分析, 此时设定如下的函数:

$$Q(V/H) = - \ln P(V/H) \quad (10)$$

其中,  $P(V/H)$  是  $k = 1$  时的似然函数,  $H$  代表待估参量(代表  $S_0$ 、 $R^0$  和  $R_h$ ), 那么误差函数可表示为:

$$E(H) = \int Q(V/H) P(V/H) dV \quad (11)$$

所以最大似然处理的偏差为:

$$\begin{aligned} E(E(H)) &= \int \frac{1}{P(V/H)} [ \int P(V/H) P(V/H) dV ] P(V/H) dV \\ &= \int P(V/H) dV \\ &= \int Q(V/H) dV = - \int 1 = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

由此可见, 最大似然估计是渐进无偏估计。

3.1.2 最大似然估计的均方差分析 根据最大似然估计的基本原理, 最大似然估计的协方差阵可表示为  $N^{-1} R^{-1}(H)$ , 其中  $N$  为独立样本数,  $R(H)$  为费希尔(Fisher)数据矩阵的阵元,  $R(H)$  的表达式为:

$$\begin{aligned} R(H) &= E [ \int \int \frac{\partial Q(V/H)}{\partial H} \frac{\partial Q(V/H)}{\partial H} ] \\ &= E [ (P(V/H))^{-2} ( \int P(V/H) ) ( \int P(V/H) ) \\ &\quad - E P(V/H) ] \quad (13) \end{aligned}$$

其中  $\int = (S/S^0, S/S^0, S/S^0)$ , 由协方差阵  $N^{-1} R^{-1}(H)$  以求得最大似然估计的均方差。

如果雷达高度计的 PRF 值为 112kHz, 取 1S 的平均时间, 数字滤波器的时间分辨率为 0.15m, 均方根波高取 5m, 信噪比取 10dB. 利用式 (13) 可以计算出似然估计的高度均方差为 61.8cm, 波高均方差为 51.2cm, 似然估计的回波功率归一化均方差为(进一步定标后, 可确定后向散射系数均方差) 0.057. 如果采用 3S 的平均时间, 精度会更高。

上述精度分析是最大似然算法机理上存在的固有误差, 根据文献[9]的分析, 最大似然算法是跟踪精度最高的算法. 目前 ESA 新一代的综合遥感卫星中的高度计(RA2)采用这一算法进行地面二次跟踪。

### 4 $\Delta B$ 滤波器

在上一节最大似然算法的实现中, 要经过积分这一环节, 即将误差信号积分后可以得到各个待估参量( $S_0$ 、 $R^0$  及  $R_h$ ), 由于二阶环良好的稳定性, 在工程实现中, 采用二阶的  $\Delta B$  滤波器来实现这一积分器的功能。

分析二阶环的特性一般从开环增益开始, 在高度计系统中选用的二阶环的开环增益为:

$$H(S) = \frac{B}{S} + \frac{A}{S^2} = \frac{B}{S^2} (S + \frac{A}{B}) \quad (14)$$

其波特图如图 8 所示。

根据自动控制理论, 在图 8 所示的波特图中, 其中的关键的点为 X2 和 B, 这两点决定滤波器的暂态特性和稳态特性, B 点决定滤波器的带宽, X2 是 -

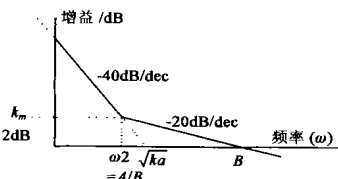


图 8  $\Delta B$ 滤波器开环增益波特图

40dB/dec 和 -20dB/dec 交点的频率, 这一点的选取取决于系统的相位裕量和系统暂态输出的超调量. 如果选取系统的超调量为 10%, 平滑系数 F 为 0.8, 那么系统的相位裕量至少为 7 $\phi$ , 这样在 0dB 的上方至少可以保持 12dB 的裕量。

将式(14)的传输函数写成 Z 域的形式, 可以得到:

$$H(z) = \frac{BT}{1 - z^{-1}} + \frac{AT^2}{(1 - z^{-1})^2} \quad (15)$$

上式中, T 为采样周期, 定义  $A = BT$  和  $B = AT^2$ , 即可确定二阶跟踪环的系数, 对于雷达高度计的跟踪处理, 一般粗跟踪的带宽取 10Hz, 精跟踪的带宽取 0.3 ~ 0.15Hz, 图 9 给出了  $\Delta B$

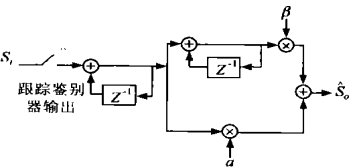


图 9  $\Delta B$ 滤波器的功能框图

滤波器的功能框图, 其输入为跟踪器鉴别器输出误差, 输出为跟踪值。

### 5 高度计跟踪器的设计

一个星载高度计数控单元的功能框图如图 10 所示, 在这个数控单元中, 跟踪处理单元是跟踪算法执行的地方, 一般由微处理器来进行, 在设计中采用 TMS320C30 处理器, 该处理器为 33.3MHz, 32 位浮点处理器。

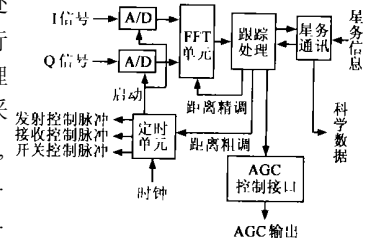


图 10 星载高度计数控单元的功能框图

处理单元跟踪的高度值分为粗距离调整和精距离调整两部分, 粗距离调整送给高速定时单元. 定时单元以 80MHz 时钟为定时脉冲, 产生发射控制脉冲、接收控制脉冲、开关控制脉冲以及 A/D 采集脉冲; 精距离调整用于 FFT 单元的距离微调, 即插入旋转因子。

跟踪单元输出的 AGC 值通过 AGC 接口送到高度计接收机的数控衰减器; 跟踪处理单元同时与卫星星务系统通讯, 以获得当前的星务信息和对高度计的数据注入信息. 跟踪处理单元还将跟踪处理得到的高度值、浪高值、AGC 值、回波波形采样值以数据包的形式串行发送出去。

软件上采用不同的环路更新因子可以选择  $\Delta B$  滤波器最终输出数据的频度, 下面给出一组设计结果:

- 高度环:  $LOPUPF(H) = 1$   
 $f_H = 0.15\text{Hz}$
- AGC 环:  $LOPUPF(A) = 10$   
 $f_A = 0.15\text{Hz}$
- 浪高环:  $LOPUPF(S) = 50$   
 $f_s = 0.15\text{Hz}$

这些设计表明, 跟踪带宽为 0.15Hz, 高度环每隔一个 PRI 时间更新一次; AGC 环每隔 10 个 PRI 时间更新一次; 浪高环每隔 50 个 PRI 时间更新一次。

## 6 跟踪器的机载飞行验证

为了对研制的星载高度计跟踪器、高度计系统以及相关的控制处理系统进行验证,进行校飞试验,为了适合飞行平台的需要,对仪器的相关部分作了适应改造,改造后的主要指标如下:

发射功率:5W;发射频率:13.9GHz,线性调频信号的调制率:333MHz/24us;PRF值:330Hz;I、Q信号采样频率:2.7MHz;I、Q信号采样点数:64点;处理算法:准最大似然跟踪处理;校飞平台:米17直升机;航高:3800米~4500米;校飞区域:广东汕头海域;校飞时间:1999年11月。

图11给出的一组曲线是跟踪器实时跟踪的输出结果。试验中采用了两种飞行方式,一种为水平飞行,其跟踪的高度轨迹如图12所示,其中横坐标代表飞行时间,单位为秒;纵坐标代表跟踪高度,单位为米。由于受气流等因素的影响,飞行轨迹在垂直方向上有一些起伏,从测量结果上看,起伏幅度在10米以内。另一种飞行方式为在垂直方向上上下起伏飞行,以验证跟踪器性能,该飞行方式的跟踪轨迹如图13所示,起伏的幅度在70米左右。

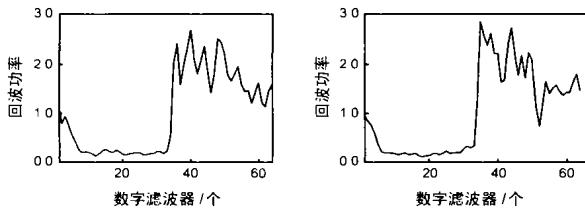


图11 机载试验跟踪波形曲线

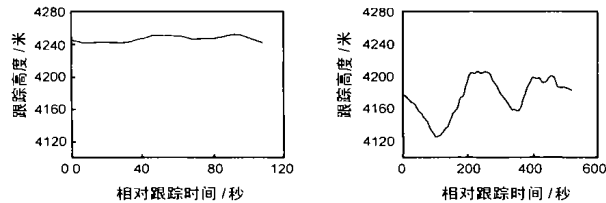


图12 机载试验水平飞行高度跟踪轨迹

图13 机载试验起伏飞行高度跟踪轨迹

由于直升机平台姿态的稳定性很差,所以此次飞行试验的目的是功能性验证。

## 7 结论

本文系统地研究了应用于海洋雷达高度计跟踪器的最大似然估计算法的原理、算法误差分析,以及 $\Delta B$ 滤波器的工作机理。在此基础上研制了基于准最大似然算法的星载雷达高度计跟踪器,该跟踪器在机载飞行试验中获得了成功,在国内首次获得了基于准最大似然算法的海洋回波曲线。跟踪器在

较差的机载平台环境下仍能实现跟踪,说明该跟踪器具有较好的健壮性,这些成果为我国星载海洋雷达高度计的发展奠定了重要的基础。

## 参考文献:

- [1] J K Ridley, K C Partington. A model of satellite radar altimeter return from the ice sheets[J]. Int J Remote Sensing, 1988, 9: 601- 624.
- [2] C H Davis. Comparison of ice sheet satellite altimeter retracking algorithms[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1996, 34(1): 229- 236.
- [3] G S Brown. The average impulse response of a rough surface and its applications[J]. IEEE Trans on Antenna and Propagation, 1977, AP25(1): 67- 74.
- [4] Paul C M, et al. Pre-launch performance of the NASA altimeter for TOPEX/ POSEIDON project[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1993, 31(2): 315- 331.
- [5] 许可,等.星载海洋雷达高度计信号处理实时仿真[J].遥感技术与应用,1999,14(1): 20- 24.
- [6] J R Jensen. Radar altimeter gate tracking: Theory and extension[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1999, 37(2): 651- 658.
- [7] FT 乌拉比, R K 穆尔, 冯建超. 微波遥感第二卷 S 雷达遥感和面目标的散射、辐射理论[M]. 黄培康, 汪一飞, 译, 北京: 科学出版社, 1987. 14- 18.
- [8] L W Brooks, R P Dooley. Technical guidance and analytic services in support of seasa2A[R]. USA: NASA CR2141399, 1975. D21, D233.
- [9] R P Dooley, F E Nathanson, L W Brooks. Study of Radar Pulse Compression for High Resolution Satellite Altimetry[R]. USA: NASA CR2137474, 1974: 29.

## 作者简介:



许可男,1967年3月出生于辽宁省盖州市,理学博士,现任中国科学院空间科学与应用研究中心)国家863计划微波遥感及信息技术实验室研究员,主要研究领域为:高分辨率海洋雷达高度计系统,微波传感器实时信号处理技术,以及星载电子产品的软件工程化。



刘和光男,1959年9月出生于北京市,现任中国科学院空间科学与应用研究中心)))国家863计划微波遥感及信息技术实验室主任/研究员,主要研究领域:空间探测技术,微波遥感技术,有源、无源微波传感器系统,微波CAD技术。