

中分辨率机载海洋雷达高度计信号 处理方法及其实现*

许 可 于志强 李茂堂 刘和光

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要 该文简要地介绍了海洋雷达高度计的工作原理,分析了“全去斜坡”技术在高度计信号处理中的时域和频域的对应关系及其相关的控制技术。研制出了分裂门跟踪和全程搜索软件,该软件在飞行实验中获得了成功,在国内首次获得了海洋回波曲线。首次提出全程搜索的方法,在此基础上提出了“平滑归并”的方法进行数据复合处理,进而提高了系统的指标。

关键词 雷达高度计, 全去斜坡, 跟踪, 数据复合

1 前 言

海洋雷达高度计是一种新型的主动式海洋遥感仪器,它通过天线向海面发射电磁波并接收海面的反射信号,能够在较大范围内实时地全天候地准确测量作业平台到海面的平均高度、海浪的有效波高和海面的后向散射系数。这些参数对于海洋学、大地测量学、地球物理学以及军事等方面的应用,都具有重要的意义,为人类认识海洋,合理开发利用海洋资源提供了一种科学的观测手段。

我们目前研制的机载海洋雷达高度计是具有中等分辨率的高度计,它采用全去斜坡(Full-deramp)和分裂门技术,共有12个斜坡门,每个斜坡门的带宽为333kHz,对应着75cm的距离,在高度测量上步进的最小距离为15cm,所以它具有的浪高分辨率为75cm,高度分辨率为15cm。

高度计的数据处理包括实时处理和后处理两部分:实时处理完成数据的实时采集、捕获回波、跟踪回波的半功率点和全程搜索回波曲线;后处理是对捕获跟踪和全程搜索的数据进行再处理以便从中提取出更精确的信息。目前这两种方法在飞行实验中获得了成功,软件的核心是全去斜坡技术。

2 高度计系统分析

2.1 雷达高度计测高原理

雷达高度计以一定的重复频率(PRF)从测量平

台向天底点的海平面发射线性调频脉冲信号,经过海平面的反射后回到接收机,在接收机内“全去斜坡”后便可以获得回波曲线,根据Brown(1977)的研究,雷达高度计平均回波信号可以表示为^[1]:

$$P_r(t) = P_{FS}(t) * Q(t) * P_{PT}(t) \quad (1)$$

其中: $P_r(t)$ 为接收回波的平均功率; P_{FS} 为平均的平坦表面的冲激响应; $Q(t)$ 为反射点的高度概率密度函数; $P_{PT}(t)$ 为雷达系统点目标的冲激响应。

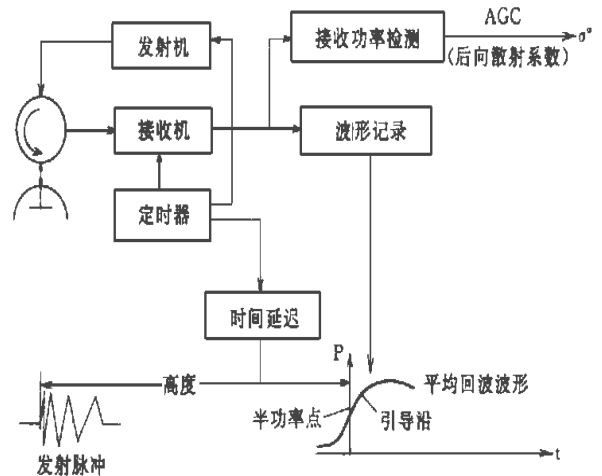


图1 雷达高度计工作过程示意图^[2]

Fig.1 Radar altimeter operation diagram

雷达高度计的基本工作过程如图1所示,其接收到的回波曲线有如下的性质:从发射到接收的时间延迟对应着测量平台到海面的高度;回波的引导沿对应着浪高信息,引导沿越平坦海浪越大,反

* 本课题为“八五”攻关课题,已通过国家验收。

收稿日期:1996年4月17日;收到修改稿日期:1996年10月24日

之引导沿越陡峭海浪越小；海面的后向散射系数对应着海风的情况，可以从回波波形平顶区信号的强弱得到。

2.2 “全去斜坡”技术分析^[3]

高度计中信号处理的核心技术是“全去斜坡”技术，它摆脱了传统雷达在时域内测量的弊病，将距离量转换为频率量。图 2 给出了雷达高度计的系

统框图，发射时：开关 k1 闭合 k2 断开，由计算机控制定时器触发色散延迟线 (DDL) 产生线性调频信号 (chirp)，经天线发射出去；接收时：天关 k2 闭合 k1 断开，定时器再次触发 DDL 产生 chirp 信号与回波进行混频，这一过程就是“全去斜坡”过程。

图 3 给出了图 2 中一些局部信号波形的示意图：(1) 图中的 f10 对应着图 2 中 d 点的波形，中

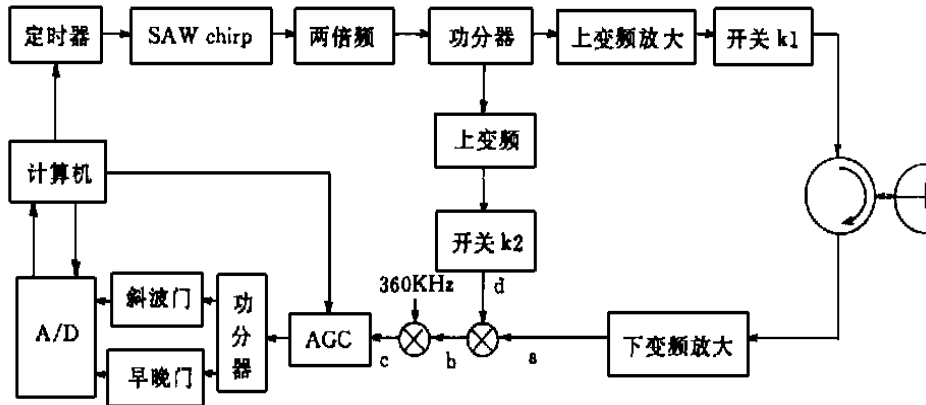


图 2 高度计系统框图

Fig.2 Radar altimeter system block diagram

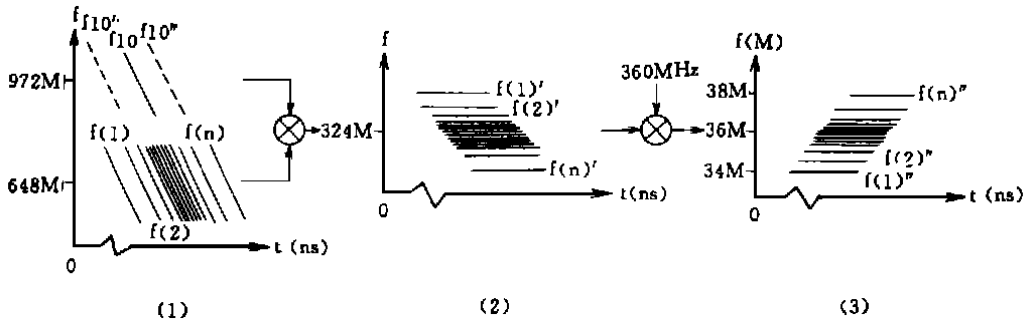


图 3 全去斜坡工作过程示意图

Fig.3 Full-deramp operation diagram

心频率为 972MHz，f(1)~f(n)对应着图 2 中 a 点的波形，中心频率为 648MHz；(2)图中的 f(1)'~f(n)''对应着图 2 中 b 点的波形，中心频率为 324MHz；(3)图中的 f(1)''~f(n)''对应着图 2 中 c 点的波形，中心频率为 36MHz。

从图中看出：在(1)中 f10 作用的时刻(即全去斜坡的时刻)对结果(3)的影响很大：如果 f10 提前 Δt 时间到来(如 f10')，则(3)中 f(1)''~f(n)'' 的频率值都将提高 $(k \times \Delta t)$ Hz，其中 k 为线性调频信号的调频斜率；如果 f10 迟到 t 时间到来(如 f10'')，则(3)中 f(1)''~f(n)'' 的频率值都将降低 $(k \times \Delta t)$ Hz。由此可以看出：如果全去斜坡的时刻沿 t 轴由小到大变化，那么(3)组中的一组频率曲线的频率值将沿 f 轴从大到小逐渐变化，进而把时间的

变化转化到频率上的变化。由于 12 个斜坡门跨越 4MHz 的带宽(34MHz~38MHz)，那么(3)中这组曲线的频率的变化过程对应着回波波形从 12 个斜坡门的高端移动至低端的现象。运用这个原理，可以捕获跟踪回波并获取回波的全程曲线。

3 分裂门跟踪及全程搜索

3.1 模式控制

高度计基本的工作模式有：噪声测量子模式、偏置测量子模式、校准子模式、自动增益 (AGC) 控制子模式、捕获子模式和跟踪子模式。

其中噪声测量子模式用来测量系统工作环境的平均噪声电平；偏置子模式用来完成系统内部电子

器件偏置误差的测量，从这两种模式的测量结果可以确定系统在捕获跟踪时的门限值；校准子模式对系统进行实时校准；AGC 子模式控制接收机的中频增益，从而使在跟踪信号回波过程中，早晚门及各斜波门的信号电平达到归一化的强度；捕获和跟踪子模式通过相应的算法，实时调整控制系统的计数时间进而调整系统的全去斜时间，使回波信号能及时准确的出现在各斜波门和早晚门中。

3.2 捕获及早晚门跟踪

捕获跟踪是高度计控制软件的核心，它用来准

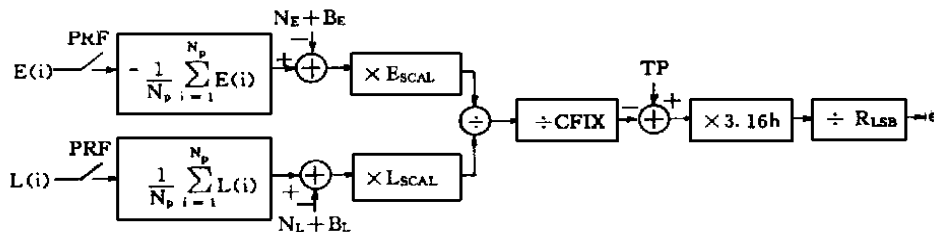


图 4 跟踪框图

Fig.4 Track block diagram

其中 $E(i)$ 、 $L(i)$ 为第 i 个脉冲的早晚门信号， $N_E + B_E$ 、 $N_L + B_L$ 分别为早晚门内的噪声和偏置， E_{SCAL} 、 L_{SCAL} 为早晚门滤波器增益， $CFIX$ 是平顶校正因子， TP 是跟踪点，在这里取 $1/2$ ， $3.1\sigma_h$ 是波高扩大因子， σ_h 是均方根波高， R_{LSB} 是高速定时系统最低有效位时间所对应的微波测距距离，通过早晚门跟踪可以得到跟踪误差 ϵ 。

3.3 α - β 滤波器

将跟踪误差 ϵ 输入 α - β 滤波器，可以预测平台的高度。 α - β 滤波器的工作原理如图 5 所示。

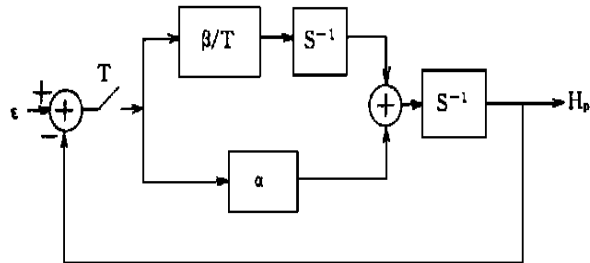


图 5 α - β 滤波器框图

Fig.5 α - β filter block diagram

其中 α 为高度平滑系数， β 为速度平滑系数， $1/T$ 是跟踪带宽， H_p 是预测高度。 α - β 滤波器的 Z 域闭环传输函数为：

$$H(Z) = \frac{(\alpha + \beta) - \alpha Z^{-1}}{(1 + \alpha + \beta) - (2 + \alpha)Z^{-1} + Z^{-2}} \quad (1)$$

确地跟踪回波的半功率点。捕获采用早晚门来进行，根据全去斜坡原理，使搜索高度由低到高逐步变化，当搜索高度达到飞机实际飞行高度时，晚门接收到的信号首先超过门限，然后早门也超过门限，当早晚门都超过各自的门限时，捕获过程完成，此时意味着回波已进入斜波门，然后转入跟踪状态。

跟踪采用分裂门跟踪^[4]，其方法是：根据飞行高度和系统内噪声的变化情况，实时地调整定时器的周期，从而调整全去斜坡过程开始的时间，使得早晚门接收到的信号的功率之比为 $1/2$ (图 4)。

跟踪带宽根据具体情况加以选择，捕获后最初的跟踪要求较高的带宽，而在跟踪锁定后跟踪带宽降低。

3.4 数据的全程搜索

根据 2.2 中对全去斜坡工作原理的分析，可以看出：如果飞机在某一高度平稳飞行，当发射信号和接收信号的时间间隔从小到大逐渐变化时，对应着从海面由低到高搜索回波的过程，如果回波存在，那么回波信号将依次从斜波门的高端移动至低端，这种现象可以证明回波信号的存在和系统全去斜坡工作的正确性，同时也可以获取回波的全程曲线。

3.5 实验结果

在飞行实验中获得了很有价值的结果，下面给出一组结果：



图 6 海面回波

Fig.6 Sea return signal

图 6 是实验中获得的一条回波曲线，横轴代表

表 1 实验结果
Table 1 Experiment data

分 裂 门	1	2	3	4	5	6
归一化强度	0.001814	0.002111	0.001431	0.000778	0.000779	0.037697
分 裂 门	7	8	9	10	11	12
归一化强度	0.804403	1.000000	0.844478	0.913768	0.824482	0.666666

当前飞行高度: 2445.75m

分析出的浪高: 0.75m(浪高的最小分辨率为 0.75m)

后向散射系数: 待定标

测量时间: 1995 年 4 月 18 日 15:33:08(北京时间)

同步测量的 GPS 的数据(格林威治时间):

H	纬 度	经 度	日 期	时 间	航高(m)
N	+36.124600	+120.868434	18—APR—95	07:33:07	02445
N	+36.124917	+120.869150	18—APR—95	07:33:08	02446
N	+36.125217	+120.869850	18—APR—95	07:33:09	02447
N	+36.125500	+120.870550	18—APR—95	07:33:10	02447

同步测量的海洋浮标的的数据(北京时间):

时期	时间	波高(m)	波向	气温(°C)	水温(°C)	气压(mb)	湿度(%)
95-04-18	15:30	0.2	NW	14.5	9.8	1014.6	35
95-04-18	16:00	0.2	NW	14.7	9.8	1015.6	30

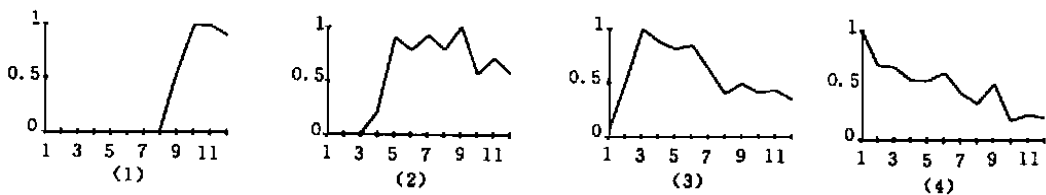


图 7 步进搜索时斜波门中的波形

Fig.7 The different return signals during full-range searching

12 个分裂门, 纵轴代表回波的归一化强度, 其值 搜索高度逐渐增加。
有关参数如表 1 所示:

3.6 结果分析

图 7 给出了飞行实验中以 0.15m 的步进间隔进行搜索时在 12 个斜波门内出现的波形, 从(1)~(4)

从实验结果来看, 现系统是符合全去斜坡工作

原理的，测量出的垂直海平面高度的精度可达 15cm，海浪高度的精度可达到 75cm，由于高度计测量的参数是一段时间内的平均值，GPS 系统测量的是瞬时值，所以二者之间存在着一定的误差；由于高度计浪高的分辨率为 75cm，低于 75cm 的分辨不出来，还有飞行海区和浮标作业区有一定距离，所以浪高的测量结果误差较大。

从图 7 可以看出，通过全程搜索软件，我们获得了回波曲线的全貌，进一步了解整个回波曲线的走向，这是跟踪软件所不能达到的，因为跟踪软件只是用来跟踪回波的半功率点，只能获得如图 6 所示的曲线，不能得到曲线的后半部分，然而后半部分也很重要，有关用户也从这部分中提取出其他信息。

4 数据的复合技术

4.1 平滑归并的基本原理

浪高的测量精度取决于各斜波门之间的频率间隔，现系统各斜波门之间的频率间隔是 333kHz，它对应 75cm 的测距距离，所以浪高的分辨能力为 75cm，因为回波曲线在频率域内是连续的，这相当于在频率域内以 333kHz 的间隔对回波曲线进行采样。如果能增加采样密度，使各采样点之间的频率间隔减小，那么浪高的分辨率将提高。由于各斜波门之间的频率间隔是硬件已经固定了的，所以只有通过软件的办法来解决。需要说明的一点是：回波曲线的横轴既可以是时间，也可以是频率，这是由“全去斜坡”的原理决定的，在这里横轴上 1ns 对应着 333/5kHz 的频率值。

由于系统定时器能达到 1ns 的精度，1ns 对应着 15cm 的微波测距距离，所以通过对以 1ns 的步进距离进行搜索的数据进行相关性平滑归并处理，可以进一步提高系统浪高的测量精度。假设在以 1ns 的步进间隔进行全程搜索的过程中，飞机的姿态变化很小，海况变化也很小，那么所得到的一组曲线的“形状”应该是完全相同的，只是沿横轴（频率轴）方向有 333/5kHz 的平移，这相当于在 333kHz 的间隔内插入 4 个点，每个点之间的间隔为 333kHz/5，它对应着 15cm 的距离，所以浪高的分辨率可达到 15cm。

图 8 中给出了时间间隔为 1ns 的 5 条回波曲线示意图：L1、L2、L3、L4 和 L5，其中 R6、R7 和 R8 分别代表第 6、第 7 和第 8 斜波门，它们之间

的间隔为 333kHz (5ns)，在 L1 上 R6 和 R7 之间插入 4 个点，这 4 个点由 R6 上与之对应的 L2、L3、L4 和 L5 上的值得到，这样合并后的 L1 上的点的时间间隔为 1ns，能分辨 15cm 的浪高。

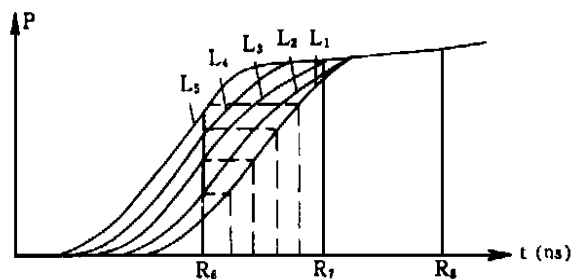


图 8 平滑归并原理示意图

Fig.8 Smoothing-combination operation diagram

4.2 实验结果

实验数据使用全程搜索软件的测量数据，其步进间隔为 15cm，一共取 25 组连续回波曲线（图 7 是其中的 4 条），对每相邻的 5 组曲线进行平滑归并合成 5 条曲线，将平滑后的 5 条曲线连接成一条曲线，然后对它再次平滑，最终得到的曲线如图 9 所示。



图 9 海面回波全程曲线

Fig.9 The full-range curve of sea return signal

其中横轴代表频率，纵轴代表回波归一化强度，从这条曲线上分析出的浪高为 0.3m，更接近于真实情况。

4.3 误差分析

平滑归并引入误差的主要原因是插入点之间的间隔是否相等，由于每条曲线是在 PRF = 1000，平均次数为 100 次的前提下得到，这样每获取一条曲线需要 0.1s，在这么短的时间间隔内海况不可能有大的变化，引起的误差只有飞机垂直方向上的抖动，该误差一方面可以用加速度计的测量值进行消除，另一方面假设飞机垂直方向的最大抖动加速度为 3m/s²，那么 0.1s 内产生的误差仅为 1.5cm，而实际上每个插入点之间的间隔为 15cm，所以最大误差不超过 10%。

5 总结

通过飞行实验证明,这种软件的设计思想是正确的,在实验中获取了大量的海面回波曲线数据,通过与同步测量的 GPS 和海洋浮标数据的比对来看,结果趋于一致。

中分辨率机载海洋雷达高度计实验的成功,为深入研究高度计作用机理、探索海面回波的一般规律提供了宝贵的第一手资料,进而为星载高分辨率海洋雷达高度计的研制奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] G S Brown. the Average Impulse Response of a Rough Surface and its Applications. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1977, AP -

25(1):67-79.

- [2] 张升伟等.中分辨率机载海洋雷达高度计系统分析及接收系统的研制. *环境遥感*, 1995, 10(3):224-235.
- [3] 朱启明.雷达高度表设计理论基础.国防工业出版社,1992(第一版),149-152.
- [4] Hughes Aircraft Company Ground System Group Final Report of the Advanced Application Flight Experiment Breadboard Pulse Compression Radar Altimeter Program. Fullerton, California, PB -0.1976.

作 者 简 介

许可,男,1967年3月出生,北京师范大学无线电电子学系电子学专业毕业,理学硕士,助理研究员。1994年至今在中国科学院空间科学与应用研究中心工作,从事微波遥感信息处理方面的研究,已发表论文4篇。

Method and Implementation of Signal Processing for the Middle-resolution Airborne Ocean Radar Altimeter System

Xu Ke Yu Zhiqiang Li Maotang Liu Heguang
(Center for Space Science and Applied Research, Academia Sinica)

Abstract This paper introduces briefly the measurement principle of radar altimeter, and discusses the relationship between time domain and frequency domain of full-deramp technology. The splitting tracking software as well as full range searching software have been developed, and the sea return curve is obtained in the successful flight experiment. The system performance is improved by data overlay named as smoothing-combination.

Key words Radar altimeter, Full-deramp, Tracking, Data overlay