

机载海洋雷达高度计的性能分析*

阎敬文 孙 辉

(中国科学院长春光学机械研究所应用光学国家重点实验室 长春 130021)

张俊荣 张升伟

祁 雷

(中国科学院长春地理研究所微波遥感室 长春 130021) (长春邮电学院 长春 130012)

摘 要 该文简要介绍了海洋雷达高度计的工作原理。对机载海洋雷达高度计的性能进行了具体的分析,对海洋雷达高度计的试验结果的分析 and 讨论表明,其性能达到了设计要求,为星载高度计提供了可靠的技术先导。

关键词 雷达高度计, 全去斜坡技术, α - β 跟踪器, 有效波高

1 引 言

1973年,美国宇航局研制出第一代雷达高度计 Skylab 的 S-193,它是一部脉冲雷达,对回波引导沿进行跟踪,测量精度为 51cm。1975年研制出第二代雷达高度计 GEOS-C,它增加了脉冲压缩与扩展技术,测高精度达 $\pm 0.5m$,1978年又研制出第三代雷达高度计 Seasat-A,它采用全去斜坡技术进行脉冲压缩和滤波器组分辨回波的方法,使测高精度达 $\pm 10cm$,有效波高测量达到 $\pm 10\%$ 。1985年,美国发射了 GEOSAT-A 的改进型,测高精度达 $\pm 3.5cm$,并首次实现对海面的精确测量。中国自 1986年开始机载海洋雷达高度计的研制工作,1988年中国科学院长春地理研究所微波室成功地完成了模拟实验,1994年完成接收机样机的研制,并成功地与中国科学院空间科学与应用

研究中心进行了联机调试。飞行结果表明,机载飞行样机的性能达到了设计要求。

2 海洋雷达高度计测高原理

海洋雷达高度计是以一定重复频率向海面发射脉冲经空间传播抵达海面,再经海面后向散射的回波信号被发射机接收。回波信号含有多种信息:(1)发射信号往复时间延迟,即平台距海面的高度。(2)脉冲在海面的散射过程,即有效波高信息。(3)回波信号强度,即后向散射系数(由此也可确定风向)。海洋雷达高度计工作原理(图1)。

雷达高度计回波能量为:

$$w(t) = p(t) \times q(t) \times s(t) \quad (1)$$

$p(t)$ 为平坦海面的冲激响应; $q(t)$ 为海面散射单元的高度密度系数,通常情况下高度密度系数接近高斯分布; $s(t)$ 为雷达系统对点目标的响应。实

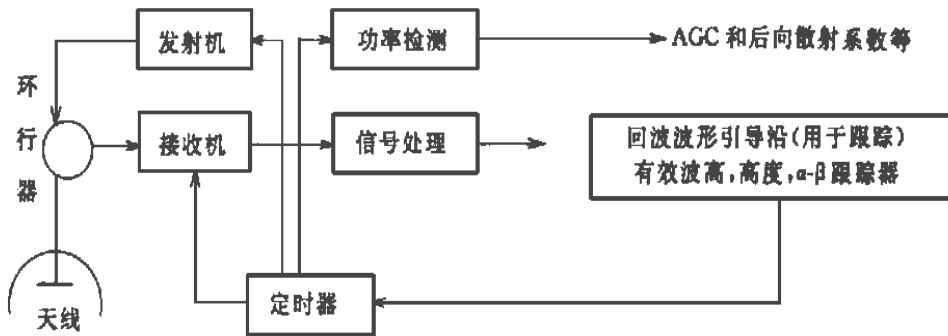


图1 高度计工作原理框图

Fig.1 Altimeter operation principle block diagram

实际上 $\bar{w}(t)$ 为 t 时刻接收机接收到所有散射单元回波能量平均叠加值。

当海面较平静时，回波能量很集中，脉冲回波波形与发射时比较脉冲展宽很少，引导沿较陡；当海面风浪较大时，回波被散射到各个方向，回波能量不很集中，脉冲展宽较大，脉冲引导沿较平缓，同时后沿将有一个缓慢衰落的尾(拖尾)。

3 海洋雷达高度计的关键技术

SEASAT-A 采用脉冲压缩全去斜坡技术和 $\alpha - \beta$ 跟踪器自适应跟踪控制技术是目前使用的两种关键技术。

3.1 全去斜坡技术

为了提高雷达系统的测量精度及分辨力，要求雷达信号具有较大的时宽-带宽-能量积。脉冲压缩就是在脉冲内附加线性调频信号，扩展信号频带来提高分辨力。雷达高度计用一个线性调频信号产生器产生线性调频信号发射信号和本振信号，接收回波信号和本振信号在混频器内混频，输出差频信号为一正弦波，去掉了线性调频，称作全去斜坡^[1]。线性调频信号脉冲信号可表示为：

$$s(t) = U(t)e^{j2\pi\left(f_0t + \frac{kt}{2}\right)} = \bar{A}\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right)e^{j2\pi\left(f_0t + \frac{kt}{2}\right)} \quad (2)$$

T 为发射脉冲宽度。若 k 大于零， f 随时间线性增加，反之为线性减少。如图 2 所示的负斜率增长的线性调频信号波形图， B 为频带带宽，当 $TB \gg 1$ 时线性调频信号能量的 95% 以上集中在 $f_0 - \frac{B}{2}$ 和 $f_0 + \frac{B}{2}$ 之间，振幅包络接近矩形。

海洋雷达高度计以一定重复频率向海面发射线

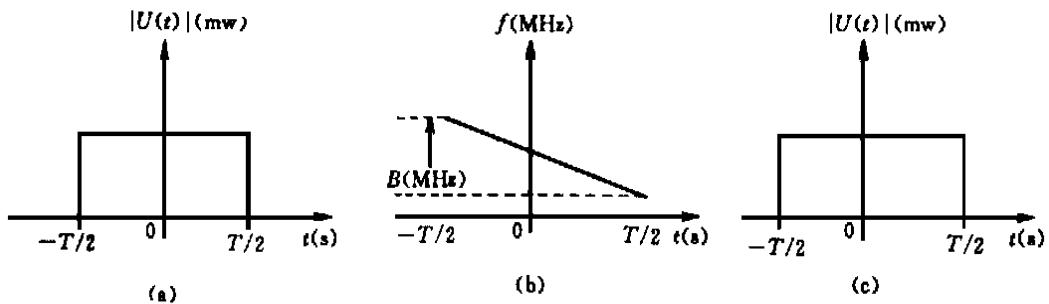


图 2 负斜率增长的线性调频信号波形图

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Fig.2 The waveform diagram of decreasing ratio chirp signal

性调频信号，传播到海面经散射后被高度计接收。雷达高度计把回波信号经全去斜坡处理后，把不同的距离差变换成频率差，再经过一次下变频处理后，把波峰和波谷间的频率差变换成相应的正弦信号。这样可用一滤波器组分辨不同距离差的正弦信号，从而确定有效波高。假设全去斜坡混频器的本振信号为：

$$s_{LO}(t) = \bar{A} \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cos(\omega_{LO}t + \pi kt^2) \quad (3)$$

到达全去斜坡混频器的回波信号为：

$$s_r(t) = \bar{A} \text{rect}\left(\frac{t + \Delta t}{T}\right) \cos(\omega_r t + \pi k(t + \Delta t)^2) \quad (4)$$

经全去斜坡混频器的差频输出信号为

$$s_f(t) = \bar{A} \text{rect}\left(\frac{t + \Delta t}{T}\right) \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \times \cos[(\omega_r - 2\pi k\Delta t)t - \pi k(\Delta t)^2 - \omega_r \Delta t] \quad (5)$$

其中

$$\text{rect}\left(\frac{t + \Delta t}{T}\right) \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = \begin{cases} 1, & -T/2 \leq t \leq T/2 \\ 0, & -T/2 \geq t, t \geq T/2 \end{cases} \quad (6)$$

可见信号持续时间为 $T - \Delta t$ ，可近似地认为持续时间为 T 。经过这样变频处理后，先到达信号频率 $f > f_I(\Delta t < 0)$ ，后到达信号 $f < f_I(\Delta t > 0)$ ， f_I 为 $t = 0$ 时信号频率，频差大小为 $|\Delta f| = |k\Delta t| = \frac{B}{T}|\Delta t|$ 。用带宽为 $1/T$ 的一组滤波器〔相应分辨率为 $\tau = \frac{1}{B}$ 〕来分辨。 B 一般几百兆赫，相应分辨率为几纳秒。这样到达时差相差一个分辨率的两个回波正好落入相邻滤波器中，起到发射窄脉冲的效果。

3.2 海洋雷达高度计的自适应控制

海洋雷达高度计的自适应控制是高度计精度和

灵敏度控制的关键技术。地形异常(海沟)和日月引力而造成的重力场变化导致的海底环流等都将引起海平面(大地水准面)发生变化。高度计的工作过程实质上就是高度计的自适应控制过程。对取得的数据进行处理分析,处理后的数据和实测数据进行比较复合,为上星高度计作技术准备。

高度计的工作过程大体分为高度捕捉和高度跟踪过程。假设卫星平台的高度为 H ,雷达发射脉冲和接收到回波的时间差为 Δt ,第2本振相对于发射脉冲的接入时间必须是 Δt 的延时,由(7)式表示:

$$\Delta t = \frac{2H}{c} \quad (7)$$

C 为光速。这样才能使全去斜坡后,不同的海区所产生的散射回波所对应的频率分量进入对应设定的滤波器组。飞机飞行的高度无法控制,只能控制延时来进行调整。每隔一定时间就调整一次,以适应不同的高度。当延时与第2混频器接入时间相差较大时,跟踪系统经运算并发出指令,为满足(1)式,使同步器改变延时的过程就是捕捉过程。当基本满足(1)式时,为使延时与第2混频器的接入时间准确地接近时,也需不断调整延时,这就是跟踪过程。

捕捉过程开始时,首先确定早门和晚门信号的阈值¹⁾。阈值是把两个门的噪声电平乘以一个常数,早门噪声电平乘以3.5作为早门的阈值,晚门的噪声电平乘以4作为晚门的阈值。关闭发射机打开接收机,自动增益控制(AGC)选择0dB,求出噪声电平。每次变换AGC值都需要重新测量噪声电平,重新确定新的早门和晚门信号的阈值。早门和晚门都设有计数器,记录回波超过早门和晚门的阈

值时间。每次发射脉冲时,接收的回波和阈值进行比较,超过一次记一个数,说明接收到回波。当高度计工作在捕捉模式时,定时计数器先以5m的粗步长增加预置数值。当晚门接收到信号时,即晚门计数器有计数时,定时器转到以精步长为9.3cm逐渐增加预置值,相应地把此步长称为精距离步长。当早门计数器所计数超过4时,捕捉模式结束,高度计开始进入跟踪模式。

跟踪模式是使用早门和晚门信号的能量平均值的比例对海平面进行跟踪。跟踪模式把加速表的输入数据在 $\alpha-\beta$ 跟踪器中进行运算,得出每次发射脉冲时的平台高度偏差 $\Delta h'_n$,加速表输出的数据 h'_{n-1} , h_n , h'_n 是通过运算求出的²⁾。根据海底环流的情况,确定相应的跟踪器带宽,尔后系列选用0.25—5Hz带宽^[2]。

把求出的高度转换成时间常数送入定时计数器中叫作高度预置。接收回波计算出此次高度值,作为下一次高度预置值。平均高度 H 、有效波高 SWH 和后向散射系数 σ^0 ,输出速率为选定的跟踪器带宽的倒数。失去跟踪后,跟踪器将重新进行捕捉。对于机载的情况,选择飞行高度是根据大气层的特性决定的。一般高度选择为3000m,垂直速度限制在50m/s。

如图3所示的捕捉与跟踪过程。(a)早门和晚门信号的阈值都没有被超过,回波波形以5步长左移。(b)晚门信号的阈值被超过,回波波形以9.3cm的精步长向左移动。(c)早门计数器的值应为4。进入跟踪模式后,落入早门和晚门内能量平均值的比趋近一个常数。回波信号进入接收机后,进行下变频(包括全去斜坡处理),放大和滤波处理后,再进行平方律检波和积分,取出落入早门和晚门内能

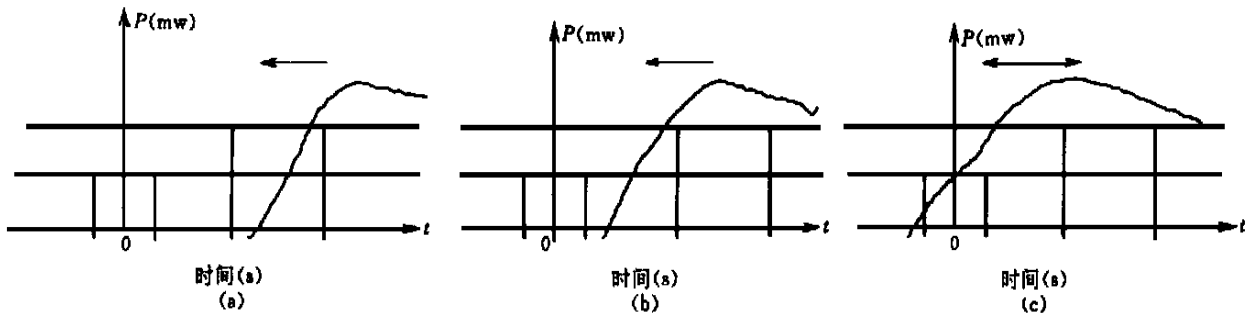


图3 高度计的捕捉与跟踪过程

Fig-3 Altimeter process of requirement and tracking

量平均值, 早门和晚门的比值为 1/2 或 1/4, 即 1/2 功率点和 1/4 功率点(不随波高变化)。根据信号到来时间确定下一次预置的高度值增减。

雷达高度计采用 $\alpha-\beta$ 跟踪器对平均海平面进行跟踪的。 $\alpha-\beta$ 跟踪器可由以下方程¹⁾定义:

$$h_n = h_{n-1} + \alpha \Delta h_{n-1} + h'_n \Delta t \quad (8)$$

$$h'_n = h'_{n-1} + \beta \Delta h_{n-1} / \Delta t \quad (9)$$

这里 h_n 是第 n 次发射高度计预置值, h'_n 是第 n 次发射高度的变化率, Δt 是发射脉冲时间间隔, α, β 是常数, 表示高度和高度变化率的记忆量。 Δh_{n-1} 是第 $n-1$ 次发射测得的高度偏差。

4 结 论

该系统已于 1994 年成功地进行了飞行实验, 并准确地收到了回波信号。通过对回波信号的处理分析, 得到了有效波高、后向散射系数值, 精度达到了设计要求(SWH 的测量误差为 30%)。但对风向风速测量误差较大。这主要是因为飞机飞行的高度较低, 对风向的测量无实际意义, 即无法实现扫描测量。这正是上星高度计将要完成的主要工作之一。上星后因飞行轨道较稳定, 能大大提高测量精度。还能获得有效波高、风向风速、海温、海洋生物回游等一系列有价值的参量。机载海洋雷达高度计的研制成功为上星高度计的研制奠定了基础。机载海洋雷达高度是为上星雷达高度作技术先导。在飞行以前对系统作了模拟实验。发射机为接收机提

供 $648 \pm 180 \text{ MHz}$ 线性调频信号, 将模拟第 1 中频回波信号衰减 20dB 后进入全去斜坡混频器, 调整连接本振电缆长度使回波落入各自滤波器中, 视频放大可获稳定输出。模拟回波信号强度为 -50 dBm 左右, 衰减 20dB 后约为 -70 dBm 。接收机前端高放约 20dB, 因此接收灵敏度为 -90 dBm , 据发射功率和回波特性及天线增益等参数, 可估算出回波信号强度大约为 -85 dBm 。接收机灵敏度完全满足要求。系统为获得 5ns 分辨率, 对应空气传播 1.5m。聚乙烯介质同轴电缆中传播距离为 1m。调整延时电缆使回波出现在某一滤波器上, 增加或减少 1m 电缆, 使回波出现在相邻滤波器上, 完全满足这一分辨率要求。

参 考 文 献

- [1] 阎敬文. 全去斜坡技术在雷达高度计上的应用. 长春邮电学院学报, 1995, 13 (3): 7-10.
- [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研制. 环境遥感, 1995, 10 (3): 224-235.

作 者 简 介

阎敬文, 男, 1987 年毕业于吉林工业大学电子系, 获工学学士学位, 1992 年毕业于中国科学院长春地理研究所微波遥感室, 获理学硕士学位。现为长春邮电学院讲师, 在应用光学国家重点实验室攻读博士学位。主要从事弱信号检测、遥感和子波分析的理论及应用研究工作, 已发表论文数篇。

The Adaptive Control Process of Ocean Altimeter

Yan Jingwen Sun Hui

(The State Key Lab. of Applied Optics, Changchun Institute of Fine Mechanics & Optics, Changchun, 130022)

Zhang Junrong Zhang Shengwei

(The Microwave Remote Sensing Department of Geographic Institute, Changchun, 130021)

Qi Lei

(Changchun Institute of Posts & Telecommunication, Changchun, 130012)

Abstract This paper briefly introduces the principle of radar altimeter. The performance analysis and key technique of ocean radar altimeter are proposed. The analysis and discussion of experimental result of ocean radar altimeter have proven that its performance has completely satisfied the design requirement, and provides the technique precedence of ocean radar altimeter on satellite in the future.

Key words Radar altimeter, Full deramp, Significant wave height, $\alpha-\beta$ tracker.

1) 张升伟. 机载海洋雷达高度计跟踪控制系统. 中国科学院长春地理研究所微波室. 1991.