

文章编号: 1007-4619(2007)04-0439-07

SZ-4 雷达高度计及其在轨测量结果

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: SZ-4 雷达高度计搭乘神舟 4 号飞船 (SZ-4) 于 2002 年 12 月 30 日发射入轨, 按预定模式工作, 获得了大量有效的观测数据。SZ-4 雷达高度计是中国第一个上星工作的实验性海洋雷达高度计, 为中国海洋动力环境卫星的发展奠定了基础。本文系统地论述了 SZ-4 雷达高度计系统方案、系统实现和在轨测量结果。

关键词: 雷达高度计; SZ-4 在轨工作

中图分类号: TP732.1 文献标识码: A

SZ-4 Radar Altimeter and Its Measurement Results on Orbit

XU Ke, LIU He-guang

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: SZ-4 radar altimeter, the first China's spaceborne experimental radar altimeter launched on Dec 30th 2002, had obtained plenty of scientific data according to the pre-designed operational modes. In this paper, the system scheme, the system realization, and the measurement results of SZ-4 radar altimeter are introduced. As the key technologies, the sea echo model which describes the scattering course of altimeter, the full de-ramp process which realizes the pulse compress for the high resolution, and the maximum likelihood estimation which performs the tracking algorithm on board are discussed in detail. The characteristics for SZ-4 altimeter hardware system are outlined, and the RF unit and the digital processing unit of this altimeter are also introduced. This paper discusses the operation modes on orbit for SZ-4 altimeter, which are bias, noise measurement, inner calibration, acquisition, tracking, communication with satellite host, data transfers, and instrument status detection. Because the altimeter and the scatterometer installed on SZ-4 worked by turn due to the power limit, the obtained data of altimeter were not consecutive. This non-consecutive observation restricts the application of the altimeter. The significant wave heights are obtained from the data on Feb 8th 2003, and the results were similar to that of the ERS2. From these results, we can conclude that this experiment on orbit had validated the function of the SZ-4 altimeter, and it would be a great contribution to the China's future Seasat.

Key words: radar altimeter; SZ-4; operation on orbit

1 引 言

卫星海洋雷达高度计是用于海洋动力环境测量的重要遥感器, 其直接测量的参数包括卫星到海面高度、海面有效波高和海面后向散射系数^[1]。雷

达高度计测量数据的进一步反演结果, 可以应用于地球物理学、海洋动力学、海洋气候与环境、海冰监测等方面。从 1973 年美国发射了天空实验室 (Skylab) 以来, 以美国和欧洲为代表已发射了系列的高度计卫星, 如 Geosat, Topex/Poseidon, GFO, Jason-1, ERS-1, ERS-2 和 Envisat 等等, 这些卫星在

收稿日期: 2006-05-26 修订日期: 2006-09-18

作者简介: 许 可 (1967—), 男, 研究员。毕业于中国科学院研究生院, 理学博士。现从事的研究领域: 高分辨率雷达高度计系统技术和高速信号处理技术。发表论文 20 余篇。E-mail: kx@mrsc.ac.cn

海洋动力环境测量方面发挥了重要的作用,已广泛的应用于军事和民用。

中国雷达高度计的发展起源于 20 世纪 80 年代,在 1995 年研制出了第一部机载海洋雷达高度计,获得了机载飞行数据^[2]。90 年代开始星载高度计的研究,其中以 SZ-4 雷达高度计为代表,其工作频率为 13.9GHz,信号带宽为 333MHz,仪器测高精度为 5m,有效波高测量精度为 0.5m,后向散射系数测量精度为 1dB。SZ-4 高度计是 SZ-4 柱载荷—多模态微波遥感器(MRS)的一部分,MRS 包括一台雷达高度计、一台微波散射计和一台多通道微波辐射计。作为中国第一个上星的微波遥感器 MRS 于 2002 年 12 月 30 日发射成功。MRS 是一个实验系统,目的是进行功能体制验证,其轨道高度为 340km。

MRS 在轨工作期间,高度计经过在轨调试后成功的捕获了回波,并进行了连续的回波跟踪,通过对获得数据的应用研究验证了高度计数据的有效性。由于 MRS 中的高度计和散射计是分时工作的,每 90ms 的时间里高度计只上电工作 20ms,所以未能获得连续的高度测量数据,但这些数据足以证明 SZ-4 高度计的功能体制是正确的。本文将就 SZ-4 高度计系统方案、系统实现及在轨测量结果这几个方面进行论述。

2 SZ-4 高度计系统方案

海面回波模型、全去斜坡技术和星上实时跟踪处理技术是 SZ-4 高度计系统方案的核心,本节中就将这几个核心技术加以论述,其中海面后向散射模型是 SZ-4 高度计设计的基础。

2.1 海面回波模型

根据 Brown 在 1977 年的研究,海面作为一个“粗糙”的散射表面,高度计平均回波波形用三项的卷积表示^[3]:

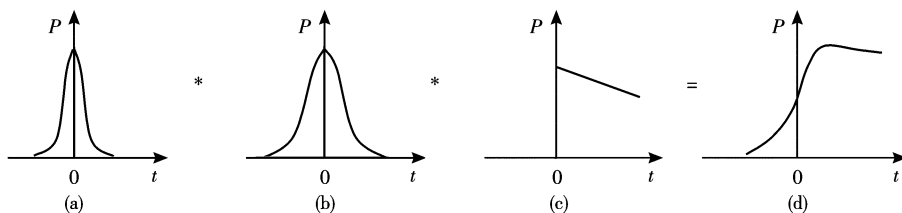


图 1 海面回波卷积过程示意图

Fig 1 Sketch map for ocean echo signal convolution

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

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

$$W(t) = \begin{cases} \eta P_T P_{FS}(0) \sqrt{2\pi} \sigma_c \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{t}{\sqrt{2}\sigma_c} \right) \right] \backslash 2 & (t < 0) \\ \eta P_T P_{FS}(t) \sqrt{2\pi} \sigma_c \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{t}{\sqrt{2}\sigma_c} \right) \right] \backslash 2 & (t \geq 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\sigma_c = [\sigma_r^2 + (2\sigma_s/c)^2]^{1/2}$, η 是脉冲压缩率, P_T 是发射脉冲峰值功率, c 是光速, σ_r 为点目标响应的 3dB 带宽, σ_s 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、有效波高和海面后向散射系数),其中回波的半功率点对应着测高值;回波的上升沿对应着海面的有效波高;回波波形的最大峰值功率对应着海面的后向散射系数^[4]。按照(1)式的要求,为了达到很高的测量精度,既要求发射脉冲宽度足够窄,又要求有较高的信噪比,所以在雷达系统中窄脉冲和高信噪比是一对矛盾。为了解决这一矛盾,在高度计中采用脉冲压缩技术,即发射信号采用线性调频信号(Chirp),在接收机内采用“全去斜坡”技术。

2.2 “全去斜坡”技术

高度计测高是通过测量发射脉冲和接收脉冲之间的时间差来测量高度的,这个时间差对应着高度测量值。在全去斜坡处理中,高度计将 Chirp 发射信号的海面后向散射回波信号和 Chirp 本振信号进行混频,这里 Chirp 发射信号和 Chirp 本振信号是由同一个线性调频信号发生器产生。全去斜坡的目的

是进行“时频转换”,即将高度计时间差的测量转换为频率差的测量。

全去斜坡过程如图 2 所示。在海洋测量的时候,高度计以一定的脉冲重复频率 (PRF) 驱动 Chirp 信号产生器产生 Chirp 发射信号,其中心频率记为 f_c 带宽为 B 时宽为 T 这个 Chirp 发射信号的海面回波由许多离散的 Chirp 信号组成,每个信号都是来自海洋表面不同小平面的回波,它们返回到高度计天线的时延不同,如图 2 中的①所示。当预计从海面的回波到达接收机时,由同一个 Chirp 信号

产生器产生一个 Chirp 本振信号,与海面回波信号进行混频。这个 Chirp 本振信号与 Chirp 发射信号具有相同的带宽和时宽,只是中心频率变为 f_0 如图 2 中的②所示。实际上,海面回波到达时间是不一样的,有的可能和 Chirp 本振同时到达,有的可能比本振早一些或晚一些。它们和 Chirp 本振混频后,不同的时间延迟就映射成中频 f_{id} 附近高于或低于 f_{id} 的恒定频率,这样就完成了“全去斜坡”过程,如图 2 中的③所示。全去斜坡技术将高度计中时间的测量转换为频率的测量。

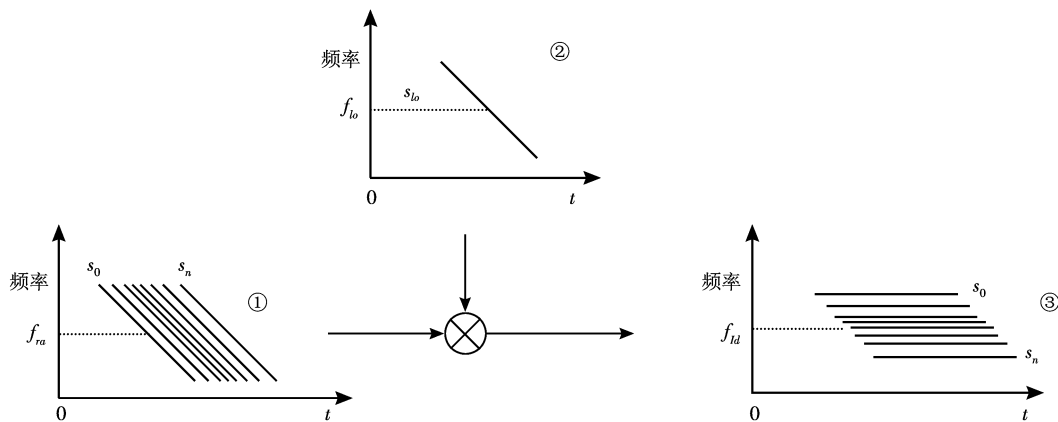


图 2 全去斜坡工作过程示意图
Fig 2 Sketch map for de-ramp processing

完成了时频转换后的中频信号,经过下变频和正交检波产生正交的视像信号 I 和 Q 然后再经过 A/D 和 FFT 处理产生如图 1(d) 所示的回波波形。此时的回波信号叠加有各种噪声,由于其对应的高度值在飞船的行进中是变化的,所以要对其进行跟踪处理。SZ-4 高度计星上采用准最大似然算法进行跟踪处理^[3],以获得连续的跟踪回波曲线。

2.3 基于准最大似然算法的星上实时跟踪处理

根据文献 [6] 扩展面目标的衰落统计特征,高度计采样后的回波波形 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:

$$P_i(V_i) = \frac{1}{V_i} \exp\left[-\frac{V_i}{\bar{V}_i}\right] \quad (3)$$

式中, V_i 表示第 i 号滤波器的波形采样值, \bar{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:

$$P(V_{1k}, V_{2k}, \dots, V_{nk} / \tau_0, \sigma^0, \sigma_h) = \prod_{i,k} \frac{1}{V_i} \exp(-V_{ik} / \bar{V}_i) \quad (4)$$

式中, V_{ik} 是第 i 个滤波器的第 k 个脉冲的波形采样值, \bar{V}_i 是第 i 个滤波器的期望值, τ_0 是高度值的待估参量, σ^0 是后向散射系数的待估参量, σ_h 是均方根波高的待估参量。

根据最大似然估计处理的定义,如果在三个参量 τ_0, σ^0 及 σ_h 一定的条件下,使得联合概率密度函数值最大,对应的 $\hat{\tau}_0, \hat{\sigma}^0$ 及 $\hat{\sigma}_h$ 即是参量 τ_0, σ^0 和 σ_h 的最大似然估计值。由此可见,实现最大似然估计要满足三个等式的要求^[7]:

$$0 = \frac{\partial \ln P}{\partial \theta} = - \sum_k \sum_i (\bar{V}_i - V_{ik}) \bar{V}_i^{-2} \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial \theta} \quad (5)$$

式中,“ θ ”代表三个参量 τ_0, σ^0 和 σ_h ,确定这三个参量的值就要解这个方程,具体实现这个技术的方法是将等式 (5) 中的偏导数 $\frac{\partial \ln P}{\partial \theta}$ 的负数作为滤波器的输入,形成负反馈,进而使 $\frac{\partial \ln P}{\partial \theta} \rightarrow 0$ 最大似然估计实现

框图如图 3所示,准最大似然估计是将最大似然估计的加窗函数 $\left(\frac{\partial \hat{N}}{\partial \hat{\sigma}_0}, \frac{\partial \hat{N}}{\partial \hat{\sigma}_h}, \frac{\partial \hat{N}}{\partial \hat{\sigma}} \right)$ 用矩形窗来替代。

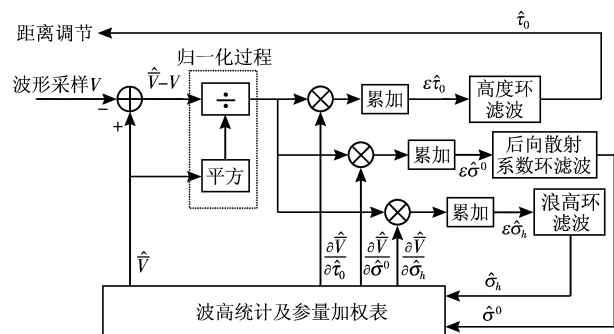


图 3 最大似然估计实现框图

Fig 3 Block diagram for maximum likelihood estimation

在最大似然估计的实现中,要经过滤波这一环节来得到各个待估参量 ($\hat{\sigma}_0$ 、 $\hat{\sigma}^0$ 及 $\hat{\sigma}_h$),由于二阶环良好的稳定性,在工程实现中,采用二阶的 $\alpha\beta$ 滤波器来实现这一功能。SZ-4高度计 $\alpha\beta$ 滤波器的传输函数如 (6)式所示,

$$H(z) = \frac{BT}{1 - Z^{-1}} + \frac{AT^2}{(1 - Z^{-1})^2} \quad (6)$$

式中, T 为采样周期,定义 $\alpha = BT$ 和 $\beta = AT^2$,即可确定 $\alpha\beta$ 滤波器的系数。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 $0.3\text{--}0.5\text{Hz}$ 。图 4给出了 $\alpha\beta$ 滤波器的功能框图,其输入为跟踪器鉴别器输出误差 $\varepsilon\hat{\sigma}_i$ (分别代表 $\varepsilon\hat{\sigma}_0$ 、 $\varepsilon\hat{\sigma}^0$ 及 $\varepsilon\hat{\sigma}_h$),输出为待估参量 $\hat{\sigma}_i$ (分别代表 $\hat{\sigma}_0$ 、 $\hat{\sigma}^0$ 及 $\hat{\sigma}_h$)。

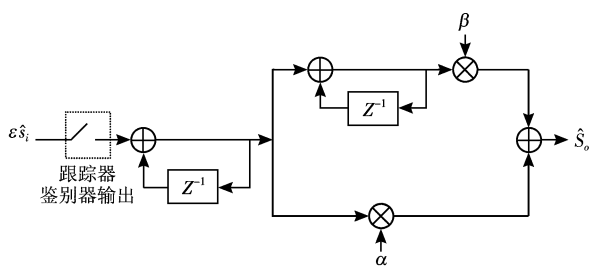


图 4 $\alpha\beta$ 滤波器的功能框图

Fig 4 Block diagram for $\alpha\beta$ filter

3 SZ-4高度计系统实现

MR中的雷达高度计、微波散射计和微波辐射计在硬件实现上是一个相互联系的整体,它们共用一个频率综合器和电源,并在中央控制单元的统一控制下协调工作,但在功能上三个遥感器彼此独立。

SZ-4雷达高度计仪器测高精度为 5m ,有效波高测量精度为 0.5m 或 10% ,后向散射系数的测量精度为 1dB 。雷达高度计硬件的技术指标见表 1。

表 1 SZ-4高度计技术指标

Table 1 The characteristics for SZ-4 altimeter

指标项目	指标
发射中心频率	13.9GHz
发射信号带宽/时宽	333MHz/24 μ s
峰值发射功率	57W
天线增益	34dBi
平均脉冲重复频率	1Hz
跟踪器类型	准最大似然估计
FFT谱分析器	64点
积分时间	50ms
轨道高度	340km

3.1 系统组成

SZ-4雷达高度计的系统框图如图 5所示,其中 Chip产生器在触发信号的作用下输出 $550\text{MHz} \pm 83\text{MHz}$ 的线性调频信号。

变频变频模块将 $550\text{MHz} \pm 83\text{MHz}$ 的信号倍频到 $1.1\text{GHz} \pm 166\text{MHz}$ 后,利用 12.8GHz 的频点生成 $13.9\text{GHz} \pm 166\text{MHz}$ 的发射信号和 $15.07\text{GHz} \pm 166\text{MHz}$ 的去斜本振信号。

行波管放大器输出的 57W 发射信号经过开关网络和天线向天底点海面发射出去,海面回波信号由天线接收并经开关网络进入低噪声放大器,与 $15.07\text{GHz} \pm 166\text{MHz}$ 的去斜本振进行混频,完成全去斜过程;然后再经过滤波放大、下变频和正交检波,生成正交的视频信号 I 和 Q 。为了实现 60dB 的动态范围,在接收机内设置了 AGC控制。开关网络还提供内校准信号的通路。

视频 I 和 Q 信号经过 A/D后进入跟踪器,在跟踪器内进行 FFT和准最大似然跟踪^[8],跟踪器功能框图如图 6所示。其中跟踪处理单元是跟踪算法执行的地方, CPU采用高速数字信号处理器 TMS320C30。跟踪处理单元输出的高度值分为距离粗调和距离精调两部分,距离精调用于 FFT单元的距离微调;距离粗调送给高速定时单元,定时单元根据距离粗调产生发射触发、接收触发、开关控制以及 A/D采集控制。跟踪单元输出的 AGC值送到高度计接收机的数控衰减器。跟踪处理单元通过 1553B总线与飞船星务系统通讯,以获得当前的星务信息。

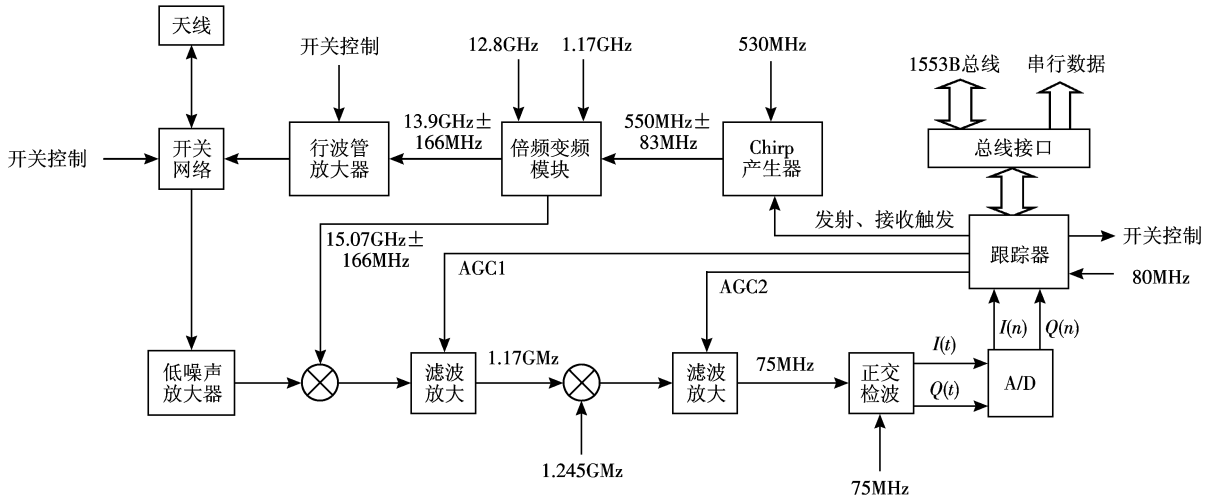


图 5 SZ-4高度计硬件系统框图

Fig 5 Block diagram for SZ-4 altimeter hardware

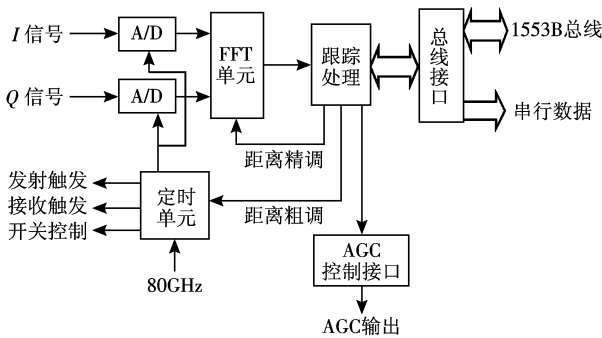


图 6 SZ-4高度计跟踪器功能框图

Fig 6 Block diagram for SZ-4 altimeter tracker

● 噪声偏置测量: 完成雷达高度计硬件系统的噪声和偏置的测量, 并以此来确定高度计的捕获、跟踪门限, 同时对回波信号进行校正。

● 内校准测量: SZ-4高度计每隔 5min 对内校准信号进行采集, 并将采集的结果打包下行。

● 捕获测量: 根据捕获范围和捕获门限, 捕获高度计回波信号。捕获测量是跟踪测量的前提, 通过捕获测量使回波信号出现在跟踪窗内。

● 跟踪测量: 该项测量是高度计工作的核心, SZ-4高度计的跟踪算法采用准最大似然算法, 实时输出跟踪高度和回波采样数据。

● 总线通讯: 通过与 1553B 总线进行通讯, 获取飞船当前的星务信息以及地面注入数据。这些信息都将被高度计跟踪器加以利用, 其中的地面注入数据, 提供了高度计在轨调试的手段。

● 高速数据传输: 高度计将实时产生的科学数据打成数据包, 通过高速串行数据通道传给飞船的大容量存储器, 当飞船过境的时候将数据传到地面接收站。

● 仪器监测: SZ-4高度计每隔 5min 会对仪器的重要监测点的监测信号进行采集, 并将采集的结果打包下行。

和地面对高度计的数据注入信息。跟踪处理单元还将科学数据 (如高度值、浪高值、AGC 值、回波波形采样值等) 以数据包的形式串行发送到飞船数管系统再传回地面。

3.2 在轨工作模式

高度计的在轨工作模式可以分为正常工作模式和异常工作模式两种^[9]。正常工作模式是指高度计能够正常捕获跟踪回波, 并实现回波连续跟踪锁定; 异常工作模式是指在高度计不能正常捕获跟踪回波的情况下, 进行回波的全程搜索, 并将搜索结果下传地面, 经地面分析后, 为在轨调试提供依据。在轨调试是通过数据注入的方法来更改高度计工作参数, 以达到高度计正常工作的目的。

正常工作模式主要包括噪声偏置测量、内校准测量、捕获测量、跟踪测量、总线通讯、高速数据传输和仪器监测等模式。下面逐一进行简单介绍:

4 在轨测量结果

SZ-4高度计发射入轨后, 根据飞船的运行轨道和仪器的工作状态, 通过数据注入的手段对其工作参数进行了调整, 调整后的仪器能够实现长时间的

跟踪, 获得了大量有效的观测数据。图 7 给出了实测的海洋回波数据曲线, 积分时间为 50ms 。图 8 给出了当高度计飞越非洲沙漠地区时获得的陆地沙漠回波曲线, 其中横轴为数字滤波器的序号, 纵轴为归一化回波功率。图 9 是利用 2003 年 2 月 8 日数据

反演出的海面有效波高图。图 10 也是利用 2003 年 2 月 8 日数据反演出的海面风速图。由于 M^fRS 中的高度计和散射计是分时工作的, 每 90min 的时间里高度计只上电工作 20min , 所以未能获得连续的高度计观测数据。

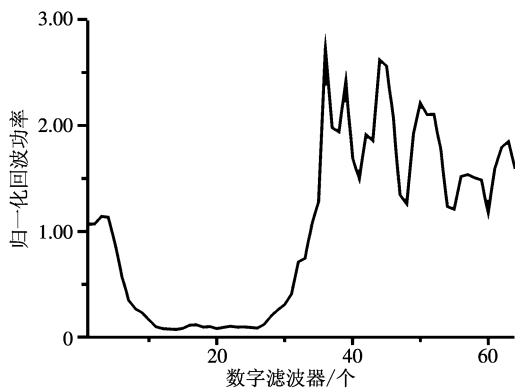


图 7 海洋回波曲线

Fig 7 Ocean echo curve

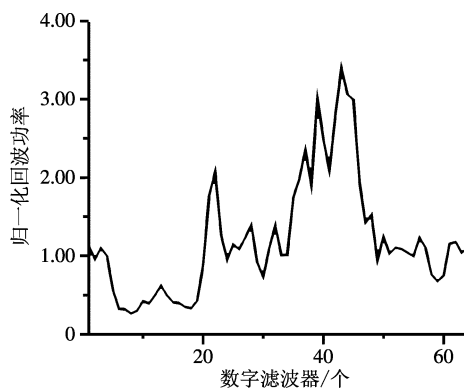


图 8 陆地沙漠回波曲线

Fig 8 Desert echo curve

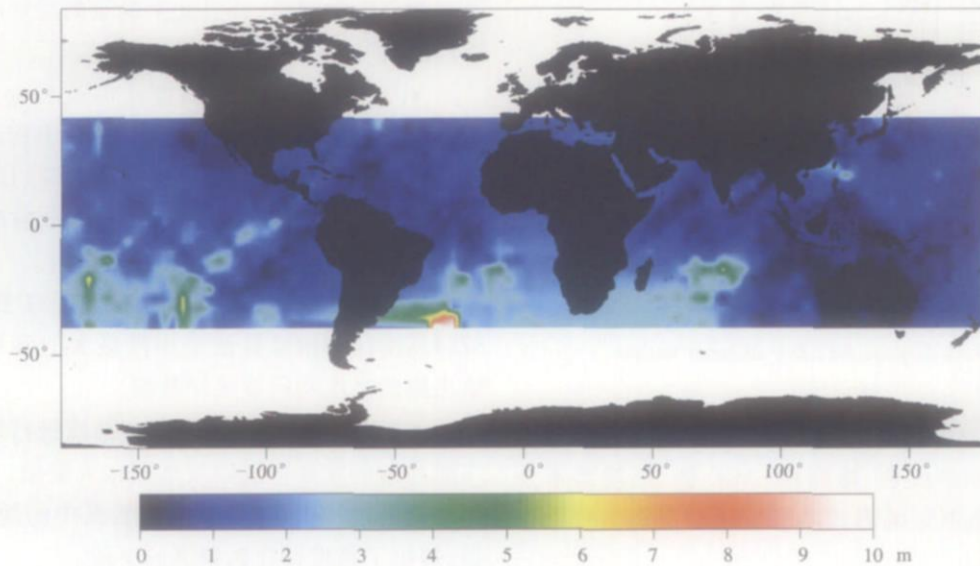


图 9 海面有效波高

Fig 9 Ocean significant wave height

因为 SZ-4 高度计与 ERS2 高度计的工作频率接近, 将 2003 年 2 月 8 日数据反演出的海面有效波高

与 ERS2 的同期测量结果进行了比对, 比对结果见表 2。

表 2 SZ-4 与 ERS2 卫星同期测量的有效波高比对结果 (2003 年 2 月 8 日)

Table 2 The statistic results of significant wave height compared with ERS2 (Feb 8 th 2003)

海域	数据点数	RMS	Bias	相对 RMS
$-180^{\circ}-100^{\circ}\text{E}-50^{\circ}-50^{\circ}\text{N}$	88	0.918	0.734	0.296
$-70^{\circ}-0^{\circ}\text{E}-20^{\circ}-50^{\circ}\text{N}$	32	0.556	-0.499	0.137
$50^{\circ}-120^{\circ}\text{E}-50^{\circ}-50^{\circ}\text{N}$	73	0.557	-0.505	0.131
$125^{\circ}-180^{\circ}\text{E} 0^{\circ}-50^{\circ}\text{N}$	28	0.512	0.484	0.093

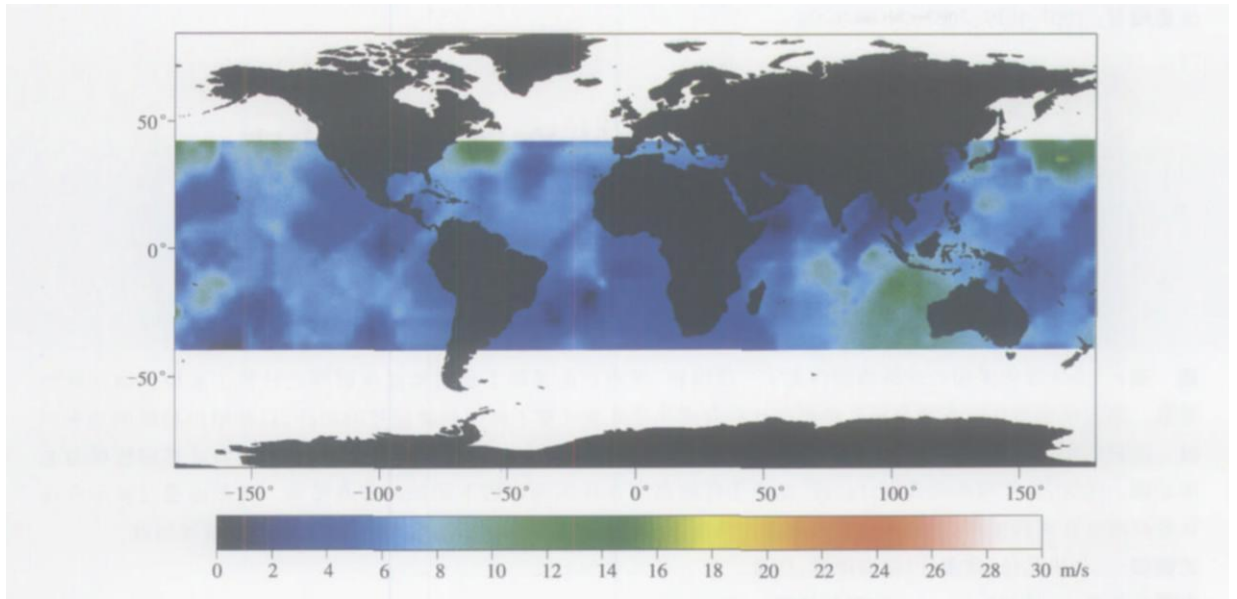


图 10 海面风速

Fig 10 Ocean surface wind speed

5 结 论

SZ-4 高度计是一个实验系统, 经过在轨的飞行试验, 获得了大量的宝贵数据, 经过分析确认这些数据为有效的雷达高度计数据。利用这些数据能够反演出有效波高和海面风速, 这些结果与 ERS2 卫星同期测量的结果很接近, 同样与海洋浮标同期测量的结果也很接近, 达到实验验证的目的。由于平台功率的限制, 每次高度计上电只能工作 20min, 不能获得全球覆盖, 这对 SZ-4 高度计高度测量的应用带来很大的限制, 在今后的海洋卫星中将全时工作, 弥补这一不足。

SZ-4 高度计作为中国第一个上星的高度计, 在中国首次获得了卫星雷达高度计数据, 完成了功能体制验证, 为中国海洋动力环境卫星的发展奠定了基础。

致 谢 文中的图 9 图 10 和表 2 是国家海洋局卫星海洋应用中心张有广博士的研究结果, 张博士的这项成果对 SZ-4 高度计的应用研究具有重要价值。在此表达作者对张博士的谢意。

参 考 文 献 (References)

- [1] Paul C M J, Robert Jensen, Charles C Kilus, et al. Pre-launch Performance of the NASA Altimeter for TOPEX/POSEIDON Project [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1993, 31 (2): 315—331.
- [2] Xu K, Yu Z Q, Li M T, et al. Method and Implementation of Signal Processing for the Middle-resolution Airborne Ocean Radar Altimeter System [J]. Journal of Remote Sensing, 1997, 1(2): 101—106 [许可, 于志强, 李茂堂等. 中分辨率机载海洋雷达高度计信号处理方法及其实现 [J]. 遥感学报, 1997, 1(2): 101—106]
- [3] Brown G S. The Average Impulse Response of a Rough Surface and Its Applications [J]. IEEE Trans on Antenna and Propagation, 1977, AP-25(1): 67—74.
- [4] Davis C H. Satellite Radar Altimetry [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1992, 40(6): 1070—1076.
- [5] Xu K, Liu H G. The Realization and Airborne Flight Experiment Verification for the Tracker of the Spaceborne Ocean Radar Altimeter Based on Sub-Optimal Maximum Likelihood Estimation [J]. Chinese Journal of Electronics, 2004, 32(6): 929—932 [许可, 刘和光. 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 [J]. 电子学报, 2004, 32(6): 929—932]
- [6] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave Remote Sensing Volume II: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory [M]. Addison-Wesley Publishing Company, 1982.
- [7] Brooks L W, Dooley R P. Technical Guidance and Analytical Services in Support of Seasat [R]. NASA CR-141399, 1975. 13-1—13-33.
- [8] Xu K, Jiang J S, Liu H G. The Design of China Spaceborne Radar Altimeter Control System [A]. Proc of GARSS 02 Symp [C]. Toronto, Canada, 2002. 3652—3654.
- [9] Xu K, Liu H G, Jiang J S. The Operational Modes and the Real Time Processing of the SZ-4 Radar Altimeter [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2005, 20(1): 162—165 [许可, 刘和光, 姜景山. SZ-4 雷达高度计在轨工作模式及实时数据处理 [J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(1): 162—165.]