

文章编号: 1007-4619(2007)03-0380-05

# 小型延时多普勒雷达高度计

许 可, 王志森, 杨双宝

(中国科学院 空间科学与应用研究中心, 北京 100080)

**摘 要:** 延时多普勒雷达高度计 (Delay Doppler Radar Altimeter, DDA) 是采用孔径合成技术进行高度测量的雷达高度计。与传统雷达高度计相比, DDA 沿航迹方向分辨率提高了 10 倍, 发射峰值功率降低了 10 dB, 测高精度提高到 2 m。采用 DDA 技术可以使仪器测量精度更高、空间分辨率更高、功耗更低, 易于实现小型化。DDA 代表了新一代的卫星测高技术, 特别适合海洋、海岸带和极冰的测量。该文就 DDA 测量机理、波形仿真和精度分析进行了研究。

**关键词:** 雷达高度计; 延时多普勒; 孔径合成

**中图分类号:** TP732.1 **文献标识码:** A

## Compact Delay Doppler Radar Altimeter

XU Ke WANG Zhi-sen YANG Shuang-bao

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

**Abstract:** Delay doppler radar altimeter (DDA) is a new radar altimeter, which utilizes aperture synthesis to improve the measurement performance. Compared with conventional radar altimeter, DDA has the resolution along track being increased by 10 times, the transmitted peak power being reduced by 10 dB, and the measurement precision of altitude being improved to 2 m. The higher measurement precision, the higher space resolution, and the lower transmitted power make DDA feasible to realize miniaturization. DDA represents a new generation of radar altimeter, and it is suitable to survey ocean, coastal zone, and polar ice. In this paper, the mechanism, the simulation of waveforms, and the precision analysis of DDA are discussed.

**Key words:** radar altimeter; delay doppler; aperture synthesis

## 1 引 言

雷达高度计目前已经作为用于海洋动力环境测量的重要遥感器, 其直接测量的产品包括卫星到海面高度、海面有效波高和海面后向散射系数。雷达高度计测量数据的进一步反演结果, 可以应用于海洋地球物理学、海洋动力学、海洋气候与环境与海冰监测等方面。自 1973 年 Skylab 试验以来, 以美国和欧洲为代表, 雷达高度计卫星已经发展成为系列化的应用卫星 (如 GEOSAT, Topex/Poseidon, Jason-1, ERS-1, ERS-2 和 Envisat 等), 其测高精度可

达 3—4 m, 技术日趋成熟。

由于传统雷达高度计采用脉冲有限方式进行高度测量, 其空间分辨率一般在 2 km 左右, 并且质量和功耗较大。在 20 世纪 90 年代, 以 Johns Hopkins 大学的 R. Keith Raney 等学者为代表提出了延时多普勒高度计的概念<sup>[1,2]</sup>, 将孔径合成的思想引入到高度计技术之后, 可以提高沿航迹方向上的空间分辨率 (可达 200 m 左右), 同时系统的测高精度也得到了提高 (优于 2 m), 系统的发射峰值功率降低 10 dB 降低了系统的体积和功耗。所以 DDA 既适合于单星测量又适用于小卫星编队测量, 对于提高高度计的测量精度和时空分辨率具有重要的意义。

收稿日期: 2006-09-01; 修订日期: 2006-10-30

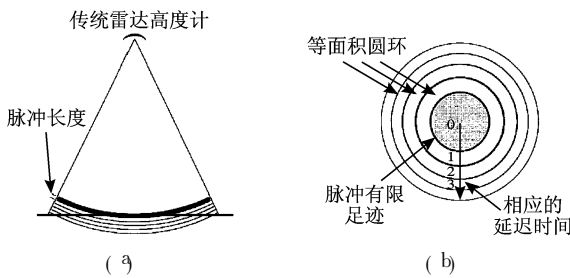
作者简介: 许 可 (1967—), 男, 研究员, 毕业于中国科学院研究生院, 物理学博士。现从事高分辨率雷达高度计系统技术和高速信号处理技术的研究, 已发表论文 20 余篇。E-mail: kxu@imrs.ac.cn

DDA 标志着高度计技术进入了一个新的阶段。

本文在参考国外有关文献的基础上, 对 DDA 的测量机理进行了分析, 并给出了相关仿真结果。

## 2 DDA 的测量机理

传统的雷达高度计 (图 1 (a) 和 (b)) 采用脉冲



有限体制进行高度测量, 在脉冲有限足迹以外, 每个散射点的散射信号都会出现在回波波形中较大延时的位置上, 压缩脉冲的长度和测量表面的平坦度决定脉冲有限足迹的大小<sup>[3]</sup>。对于一个典型的雷达高度计, 如 GEOSAT 脉冲有限足迹的直径在 2 km 的量级, 当测量表面的粗糙度加大时, 脉冲有限足迹的直径会随之增加。

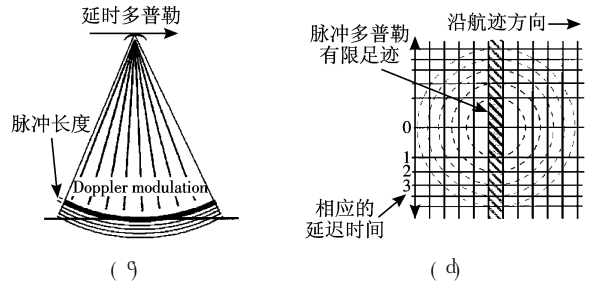


图 1 (a) 传统高度计波束照射侧视图; (b) 传统高度计足迹的平面图; (c) DDA 波束照射侧视图; (d) DDA 足迹的平面图

Fig 1 The illumination geometry side view (a) for conventional RA and (c) for DDA and the footprint plan view (b) for conventional RA and (d) for DDA

传统雷达高度计的脉冲有限工作体制使得高度计的发射功率浪费很大, 以 GEOSAT 高度计为例, 在 3 dB 天线波束宽度内只有约 1/10 的发射功率在脉冲有限足迹以内, 其他大部分的功率均在脉冲有限足迹以外, 这部分功率对高度测量的贡献很小。另外一个不利的影晌是, 当测量表面的粗糙度加大的时候, 脉冲有限足迹也随之增加, 当扩大的足迹内高度发生变化时, 这种足迹不能有效地跟踪高度的变化, 进而使测量性能下降。

DDA 由于采用延时多普勒技术<sup>[4,5]</sup>, 沿航迹的信号历史经过处理都对高度测量做出贡献, 这样高度计利用了更多的辐射能量, 而传统的雷达高度计主要只利用了脉冲有限足迹内的能量进行高度测量。DDA 的发射信号采用了大时宽的线性调频信号, 目标的回波信号进入接收机的时候, DDA 将发射信号复制了一份与回波信号进行混频, 即去协处理, 完成了时间-频率的转换。上述过程中 DDA 和传统高度计的处理过程是一致的<sup>[6]</sup>。

传统的雷达高度计不考虑回波脉冲之间的相关性, 而在 DDA 中则利用了连续回波之间的相关性。在去协混频以后, DDA 引入了沿航迹方向上的处理, 将回波信号空间变成了二维 (图 1 (c) 和 (d))。

DDA 将接收的信号存储在存储器内, 在沿航迹二维进行 FFT 变换, 然后进行距离延时校正。在每个多普勒频率单元内, 对距离数据进行逆变换、检测、累加进而形成同一位置的多视数据。如图 2 所示,

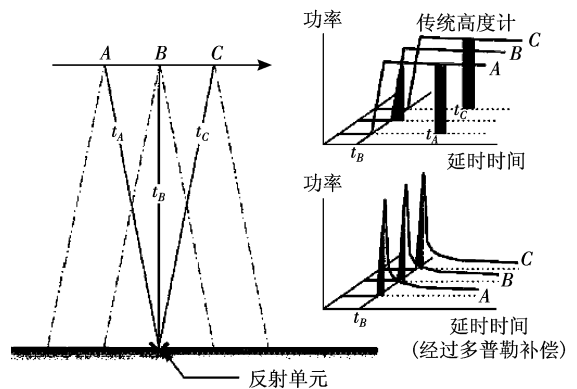


图 2 DDA 回波延迟多普勒补偿过程示意图

Fig 2 The sketch map for the delay/Doppler compensates of DDA

DDA 的平坦表面响应具有脉冲响应的形状。

DDA 的主要信号处理流程如图 3 所示, 其中 2 维延时相位系数由 (1) 式确定,

$$\Phi(f, t) = \exp\left\{ + j2\pi k_r \frac{2}{c} \delta(f) t \right\} \quad (1)$$

式中,  $k_r$  是线性调频信号的调频斜率,  $\delta$  是相对于脉冲有限足迹的相对延时。

经过这一步的处理, 对于每一个单元, 在距离方向上的频率正比于相对距离跟踪点的延时, 在沿航迹方向上的频率正比于相对零多普勒位置的偏移。

接下来的处理是并行处理, 包括距离方向上的 FFT 信号检测和沿航迹方向上的高度估计。上述过程重复进行, 这样在沿航迹方向上的每一个位置

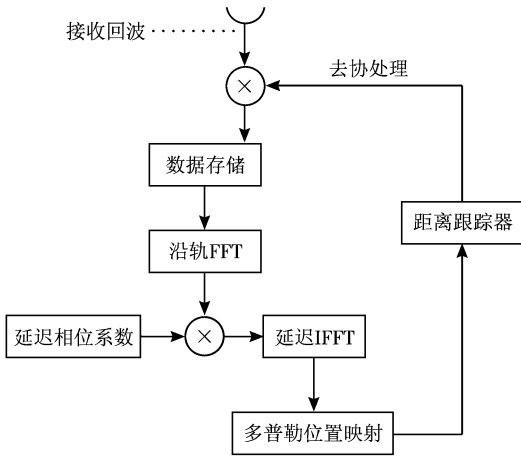


图 3 延时多普勒处理逻辑流程图

Fig 3 The logical flow for DDA processing scheme

即可以得到多次观测数据进行累加。当波束依次照射每一个散射点时,相应的高度估计依次从高多普勒频率滤波器移动到低多普勒滤波器直到散射体移出视野。这样最终的高度估计是从所有多普勒滤波器输出的平均得到。沿航迹的脉冲响应取决于多普勒滤波的加权,沿航迹的脉冲位置取决于回波数据零多普勒频率的位置。

传统的脉冲有限雷达高度计的有效接收功率和 DDA 的有效接收功率分别为 (2) 式和 (3) 式。

$$P_{PL} = \frac{P_T G^2 \lambda^2 (TBP) \pi \epsilon \sigma^0}{(4\pi)^3 R^2 \alpha_R} \quad (2)$$

$$P_{DD} = \frac{P_T G^2(\theta) \lambda^2 (TBP) \sigma^0}{(4\pi)^3 R^2} 2\beta \sqrt{\epsilon \alpha_R} \quad (3)$$

$$\text{轨道因子 } \alpha_R \approx \frac{R_E + h}{R_E} \quad (4)$$

式中,  $P_T$  是发射功率,  $G(\theta)$  为天线增益,  $\lambda$  是发射信号的波长,  $TBP$  是发射信号的时带积,  $\tau$  是压缩后的信号时宽,  $\sigma^0$  是观测目标的后向散射系数,  $h$  为卫

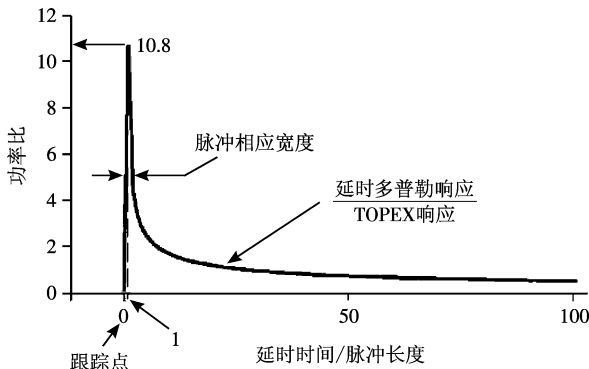


图 4 DDA 和传统高度计回波响应比较

Fig 4 The comparison of response between DDA

and conventional RA

星到观测目标的距离,  $R_E$  为地球半径,  $\beta$  为天线沿航迹方向上的波束宽度。

以 TOPEX 高度计为例,在相同的发射功率、相同的波束宽度、相同的发射信号和距离分辨率等条件下,仅仅不同的是高度计工作在 DDA 模式。根据 (3) 式和 (4) 式,可以计算出它们平坦表面响应的比率<sup>[1]</sup> (图 4),由此可以看出 DDA 比传统高度计的响应要强 10 dB。

### 3 仿真验证及精度分析

为了验证 DDA 的相关特性,对 DDA 的回波进行了仿真。根据文献 [7] 和文献 [8], 对应于表 1 中参数的仿真海洋表面如图 5 所示。根据表 2 对 DDA 工作参数进行了设置,此时仿真的 DDA 回波波形和传统雷达高度计的回波波形对比如图 6 所示。

表 1 仿真的海洋表面参数

Table 1 The simulated sea surface parameters

海面区域 (长×宽)	16 km×16 km
面元分辨率 (长×宽)	10 m×10 m
海面风速	12 m/s
海面风向	90°
涌浪波长	300 m
涌浪方向	90°
涌浪谱宽 $\sigma_{kv}$	0.0025/m
波高	4 m

表 2 仿真的 DDA 系统参数

Table 2 The simulated DDA system parameters

抛物面天线直径	1.3 m
发射信号波长	2.2 cm
发射信号带宽	320 MHz
发射信号脉冲宽度	57.8 μs
脉冲重复频率	14 KHz
平台高度	800 km
天线指向角	天底点
合成孔径长度	35 m

在图 6 的结果中, DDA 曲线与传统高度计回波曲线进行比较,可以看出 DDA 回波功率比传统高度计高约 10 dB 这与图 4 的结论是一致的。

根据 J Robert Jensen 和 Keith Raney 等人的研究, DDA 比传统高度计具有更高的测量精度,其结果如图 7 所示<sup>[2]</sup>。

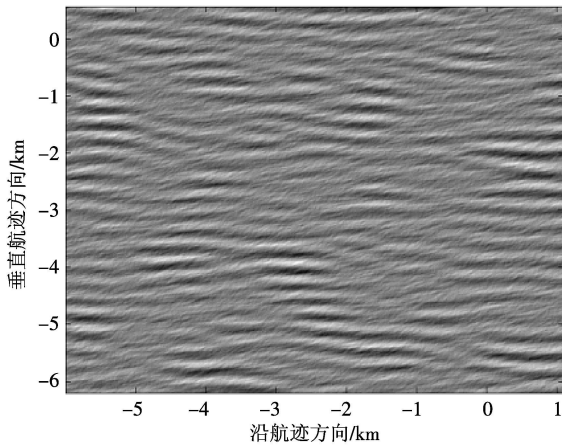


图 5 仿真的海面

Fig 5 The simulated sea surface

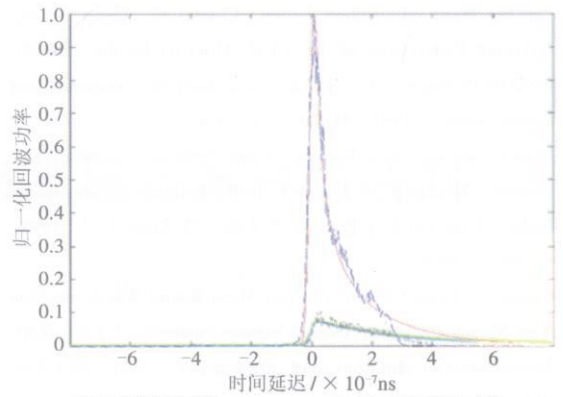


图 6 仿真的海面回波波形

Fig 6 The simulated sea echo waveforms

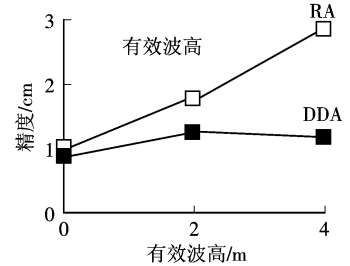
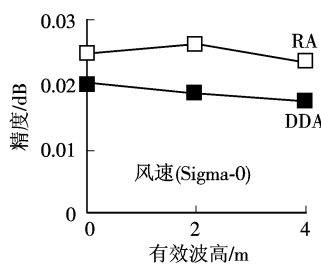
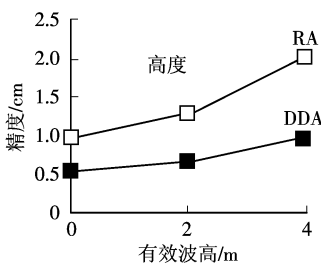


图 7 DDA与传统雷达高度计的测量精度比较

Fig 7 The comparison of precision between the DDA and conventional RA

由于 DDA 具有精度高、重量轻、功耗低的优点, API 提出了基于 DDA 的小卫星编队飞行的方案 (W IIIEEX 计划)<sup>[9]</sup>。该计划采用一箭三星的方式进行编队高度测量, 利用地球自转提高了测量的时 / 空分辨率, 如图 8 所示。

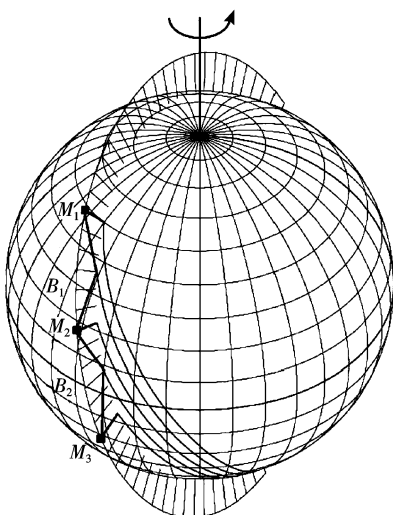


图 8 基于 DDA 的三星编队飞行示意图

Fig 8 The sketch map of the three satellite

formation based on DDA

## 4 结 论

DDA 代表了新一代的雷达高度计, 由于采用了延时多普勒技术, 使得来自脉冲有限足迹以外的散射单元的回波信号对高度测量做出贡献。由于采用了延时补偿技术, 使得高度估计的有效性提高了, 高度估计足迹的几何稳定性提高了, 每个高度估计的平均次数增加了, 从而提高了测高精度。与传统雷达高度计相比, DDA 沿航迹方向分辨率提高了 10 倍, 发射峰值功率降低了 10 dB, 测高精度达到 2 cm。这一技术使得雷达高度计可以利用较少的星上资源然而性能却得以显著提高, 同时 DDA 对于海岸带和海冰的测量较之传统高度计更具优势。

## 参 考 文 献 (References)

- [ 1 ] R Keith Raney, The Delay/Doppler Radar Altimeter [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36( 5 ): 1578—1588
- [ 2 ] J Robert Jensen, R Keith Raney, Delay/Doppler Radar Altimeter: Better Measurement Precision [ A ]. Proc. of IGARSS 98, SMP1.1. Q., 1998, 4: 2011—2013.

- [ 3 ] Paul C. Marth, J. Robert Jensen, Charles C. Kilgus, et al. Pre-launch Performance of the NASA Altimeter for the TOPEX/POSEIDON Project [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(2): 330—331.
- [ 4 ] Picardi G, Iovanni S, Robero S, Serge S, et al. Extensive Non-coherent Averaging in Doppler Beam Shaped Spaceborne Radar Altimetry [ A ]. Proc. of IGARSS 98 Symp. [ C ], 1998, 5: 2643—2645.
- [ 5 ] George S. Hayne. Radar Altimeter Mean Return Waveforms from Near-Normal Incidence Ocean Surface Scattering [ J ]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1980, 28(5): 687—692.
- [ 6 ] 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 ].
- [ 7 ] Donegan M A, Pierson W J. Radar Scattering and Equilibrium Ranges in Wind-generated Waves with Applications to Scatterometry [ J ]. Journal of Geophysical Research, 1987, 92(5): 4971—5029.
- [ 8 ] Stephen L Durdan, John F Vescky. A Physical Radar Cross-Section Model for a Wind-Driven Sea with Swell [ J ]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1985, 10(4): 445—451.
- [ 9 ] R. Keith Raney, David L. Pomeroy. WITEX: An Innovative Three-Satellite Radar Altimeter Concept [ A ]. Proc. of IGARSS 00 Symp. [ C ], 2000, 7: 3190—3192.