

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312226

基于机载相控阵海浪波谱仪的海浪谱测量^{*}

江柏森^{1,2}, 韩倩倩^{1,2}, 曹 蕾^{1,2}, 张 晰^{2,3}, 叶洪玲¹

(1. 北京遥测技术研究所微波遥感技术研究室 北京 100010; 2. 自然资源部海洋遥测技术创新中心 北京 100010;
3. 自然资源部第一海洋研究所 青岛 266061)

摘 要:提出一种机载相控阵海浪波谱仪,是 Ku 频段、线极化二维相控阵列雷达,发射宽带线性调频信号,在小入射角下照射海面,接收被海面准镜面散射调制的回波功率,获取海面后向散射系数,反演得到一维海浪谱。通过二维相控阵实现 0~360° 方位向的圆锥扫描,获取二维海浪方向谱,进而计算波高、波向、波长等海浪参数产品。一方面,采用基于二维相控阵的动态波位驻留时序设计,将均匀扫描改为非均匀扫描,增加沿航向的观测时间,提高沿航向斑点噪声抑制水平,改善了中法海洋卫星 SWIM 载荷的“沿航向信斑比不足”的问题,使观测效能得到提升;另一方面,采用电子扫描,无旋转机构,可大幅度提升波谱仪设备的紧凑性、适装性和可靠性,提高机载平台适应能力。在秦皇岛附近的渤海海域开展了相控阵海浪波谱仪飞行试验,与同步波浪浮标观测数据进行对比,结果表明相控阵海浪波谱仪波向测量精度优于 15°, 波长测量精度优于 10%, 有效波高测量精度优于 0.3 m, 验证了动态波位驻留对沿航向斑点噪声的抑制能力,以及相控圆锥扫描体制获取海面回波、反演海浪谱的性能。

关键词:相控阵海浪波谱仪;海浪谱;机载雷达

中图分类号: TH841 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Wave spectra measuring from airborne phased-array wave spectrometer

Jiang Bosen^{1,2}, Han Qianqian^{1,2}, Cao Lei^{1,2}, Zhang Xi^{2,3}, Ye Hongling¹

(1. Microwave Remote Sensing Department, Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100010, China;
2. Ocean Telemetry Technology Innovation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100010, China;
3. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China)

Abstract: This study proposes a new airborne phased-array wave spectrometer (PAWS), which is a Ku-band, linear polarization two-dimensional phased-array radar. It transmits a wideband linear frequency modulation signal, illuminates the sea surface at a low incidence angle, and receives echo power modulated by quasi-specular reflection from the sea surface. From the echo power, the sea surface backscattering coefficient and the one-dimensional wave spectrum can be retrieved. With conical scanning from 0° to 360°, two-dimensional wave spectrum, and main wave parameters are obtained by PAWS as well, such as significant wave height, wave direction, and wavelength. On one hand, the dynamic beam position chronogram design (DBCD) benefited from the two-dimensional phased array radar is adopted. For the extension of observation time and the suppression of speckle noise of the along-track, it makes non-uniform scanning possible instead of uniform scanning to improve the insufficient along-track signal-to-speckle noise ratio of CFOSAT SWIM. Thus, better efficiency of PAWS is achieved. On the other hand, electrical scanning of the phased-array radar without a rotating mechanism can greatly improve the compactness, adaptability, and reliability of PAWS. Therefore, it can be mounted on various aircraft platforms. The PAWS field campaign was held in the Bohai Sea near Qinhuangdao in 2023, with synchronous buoys moored there. The results show that the accuracy of PWS's dominant wave direction is better than 15°, the accuracy of the dominant wavelength is better than 10%, and the significant wave height is better than 0.3 m. The DBCD is proven to work for the suppression of the speckle noise along the track. The performance of the phased-array conical scanning for receiving sea surface echoes and retrieving wave spectra is also verified.

Keywords: phased-array wave spectrometer; wave spectra; airborne radar

收稿日期: 2023-12-02 Received Date: 2023-12-02

^{*} 基金项目: CFOSAT 及海风海浪卫星专项研究基金(2023CF0003)项目资助

0 引言

海洋在国家权益、海洋经济发展、国防安全建设、科学研究等领域具有重要的战略地位。海浪是海洋工程中的重要动力环境因素之一,海浪要素是工程设计普遍关注的重要条件。二维海浪方向谱(简称海浪谱)是对海浪基本信息的最佳描述,表征海浪能量相对于频率和方向的分布。海浪谱数据在海洋防灾减灾、海洋经营和海洋学研究方面应用需求广泛^[1]。其中,海浪谱观测是改进海洋数值预报的关键资料,在海洋防灾减灾中需求迫切。与有效波高的传统同化不同^[2],在数值模式中增加海浪谱的同化数据,可直接修正每个波列的平均波参数,可有效修正峰值周期,尤其对于混合海浪和涌浪,使海浪数值预报的精度显著提升^[3]。

当前海浪谱的观测方式中,浮标系统为定点测量,成本较高,难以提供广阔的外海区域信息。星载高度计是微波方式海面波浪观测的主要仪器之一,它的主要局限性是只能提供波浪能量,给出有效波高、海面高度和星下点风速,不能给出海浪谱和风场参数信息^[4]。合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)作为能获取海浪波谱信息的星载仪器,由于功耗过大,长时间连续工作对雷达系统是非常严重的负荷;此外,由于速度聚束调制影响,SAR仅能成像波长大于150 m的海浪^[5]。使用光学技术是测量海浪谱的另一个途径,但该方法只能工作在大气状况较好的情况下,并且需要很大的处理量,因此适用范围受到限制^[6]。中法海洋卫星波谱仪(surface waves investigation and monitoring, SWIM)载荷(法国国家空间研究中心研制)自2018年12月开始在轨运行,获取了丰富的海浪谱数据,已应用于海浪预报及海况科学研究^[7-9]。

SWIM是工作在Ku波段的小入射角真实孔径雷达,共有0°、2°、4°、6°、8°和10°6种工作波束,其天线采用均匀旋转、机械扫描工作方式。本文在现有SWIM的技术基础上,提出一种相控阵海浪波谱仪(phased-array wave spectrometer, PAWS),采用二维相控圆锥扫描,通过移相器改变各个阵元的相位来控制波束的指向。一方面,海浪观测效能得到提升。区别于SWIM机械旋转需要均匀、连续扫描,相控阵海浪波谱仪可实现各个波位的动态波位驻留,即非均匀扫描;从探测体制上,延长信斑比不足方向的驻留时间,可以改善目前SWIM存在的“沿航向信斑比不足”问题,即斑点噪声^[10]淹没了海浪回波信号的问题。另一方面,采用电子扫描,无旋转机构,易于实现高可靠设计,可大幅度提升波谱仪设备的紧凑性、适装性和可靠性,提高机载平台适应能力。

1 相控阵海浪波谱仪雷达系统

1.1 测量机理

海浪波谱仪在小入射角范围内工作,海面散射主要表现为准镜面散射。将海面看作由长波浪(简称长波)和叠加在其上的短波浪(即短波)组成。海浪波谱仪接收的后向散射信号主要来自于波长为测量电磁波波长的3~5倍的短波直接贡献^[11]。然而,长波对短波有倾斜调制的作用,这会改变局地入射角。在以上条件满足时,可忽略水动力调制,线性的倾斜调制起主要作用;小入射角、长波波陡小于10%以及方位向足迹宽度大于对应方向表面相关长度^[4]。简而言之,海浪波谱仪在测量时,通过小入射角和适当的波浪条件可以忽略水动力调制的影响,使得后向散射信号主要受到线性的倾斜调制作用,从而实现对面散射的有效测量。

海浪波谱仪工作机理如图1所示,当波浪局地倾斜使得海面面元朝向雷达时,海面回波强,海浪波谱仪接收到的信号强度大于平均值;反之,当波浪局地倾斜使得海面面元背向海浪波谱仪时,海面回波弱,海浪波谱仪接收到的散射信号强度小于平均值。这种海浪波谱仪信号的变化与局地海浪倾斜密切相关。

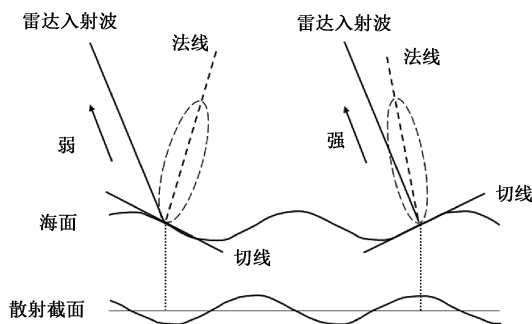


图1 海浪波谱仪工作机理^[12]

Fig. 1 Working mechanism of wave spectrometer^[12]

雷达信号的幅值变化与海浪局地倾斜的大小有关,而雷达信号变化的频率与海浪局地倾斜的符号改变的频率有关^[12]。海浪波谱仪探测得到的调制函数 $m(x, \phi)$ 为^[13-14]:

$$m(x, \phi) = \frac{\int G^2(\varphi) \frac{\partial \sigma}{\sigma} d\varphi}{\int G^2(\varphi) d\varphi} = \frac{\int G^2(\varphi) \alpha(\theta) \xi_x d\varphi}{\int G^2(\varphi) d\varphi} \quad (1)$$

式中: x 为地距向上的距离; ϕ 为方位角; $\frac{\partial \sigma}{\sigma}$ 表示单个面元内的散射截面变化;参数 α 与入射角度有关。 $m(x, \phi)$ 自相关函数的傅里叶变换记作信号调制谱 $P_m(k, \phi)$,即^[15-16]:

$$P_m(k,\phi)=\frac{1}{2\pi}\int\langle m(x,\phi),m(x+s,\phi)\rangle\exp(-iks)\mathrm{d}s$$

(2)

1.2 机械扫描下“沿航向信斑比不足”问题

对于传统波谱仪 SWIM 而言,其天线在机械电机控制下仅能采取均匀、连续的扫描方式,所以天线在各波位获取的脉冲个数均相同。当天线工作在沿航向时,天线探测得到的回波信号对应的多普勒带宽会变小,相应的独立脉冲个数也会变小,导致沿航向斑点噪声急剧增大,信斑比急剧减小,即机械扫描下“沿航向信斑比不足”问题^[10]。根据 SWIM 载荷数据分析,该问题明显存在于天线指向与航向间夹角 15°的范围内。

1.3 雷达系统

相控阵海浪波谱仪是 Ku 频段、单极化的二维相控阵列雷达,通过发射宽带线性调频信号,在小入射角下照射海面,并接收被海面准镜面散射调制的回波功率,去除雷达有效全向辐射功率(effective isotropic radiated power, EIRP)、天线方向图、系统损耗等影响后,可以获取海面后向散射系数,反演得到一维海浪谱。通过二维相控圆锥扫描实现 0°~360°方位向的扫描,获取二维海浪谱,进而计算波高、波向、波长等海浪参数产品,观测几何如图 2 所示。

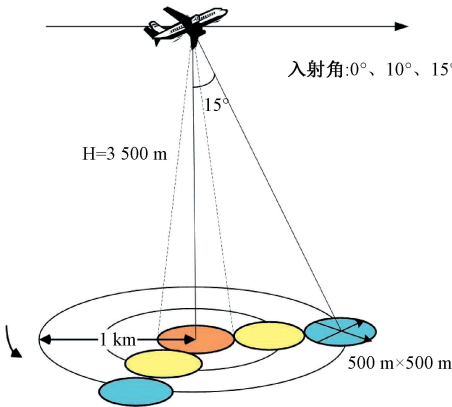


图 2 观测几何及波束足印

Fig. 2 Observing geometry and the footprints

相控阵海浪波谱仪主要由二维相控圆锥扫描天线、微波收发信道、信号处理器和整机结构组成如图 3 所示,主要雷达参数如表 1 所示。

1) 相控阵天线

二维相控圆锥扫描天线采用微带天线阵列形式,为 VV 极化,包含 6×8 个单通道 TR 组件,通过调整每个通道的电磁波相位,实现特定波束指向电磁波的发射与接收。发射时,按照入射角 {0°、10°、15°、10°、15°} 顺序,依次切换波束中心角度。接收时,原始海面回波信号经天线阵面的增益放大后,发送至 TR 组件接收通道,经低噪声放大后传递至收发驱放模块进行合路,然后发送至微波收发信道。

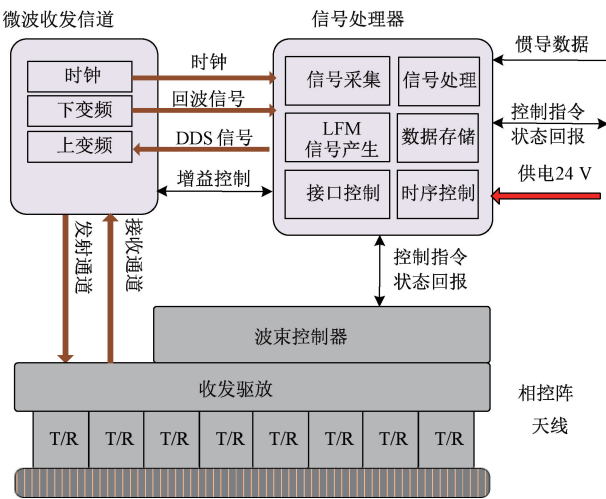


图 3 相控阵海浪波谱仪组成框图

Fig. 3 Block diagram of the PAWS

表 1 相控阵海浪波谱仪及飞行平台主要参数

Table 1 Major parameters of the PAWS

序号	雷达系统参数名称	参数取值
1	飞行高度	3 500 m
2	飞行速度	77 m/s
3	工作频率	Ku
4	工作带宽	320 MHz
5	重频	5 000 Hz
6	脉宽	5 μs
7	有效各向辐射功率(EIRP)	72 dBmW
8	通道个数	6×8
9	天线扫描范围	方位角 0°~360°,入射角 0°~20°
10	波束宽度	9°×12°
11	天线口面尺寸	120 mm×140 mm
12	整机尺寸	120 mm×140 mm×150 mm
13	整机重量	3 kg
14	整机功耗	100 W

2) 微波收发信道

微波收发信道由上变频通道、下变频通道、时钟模块组成。上、下变频通道共用本振,均采用一次变频。时钟模块主要包括 1 路本振和时钟输出,为雷达系统提供频率基准源。发射时,上变频通道把信号处理器发送来的 1.8 GHz 中频 DDS 信号搬移到 Ku 频段,经滤波后发送给相控阵天线。接收时,将天线传递来的 Ku 频段射频信号下变频到中频 1.8 GHz,滤波后发送至信号处理器。

3) 信号处理器

信号处理器包括接口控制、时序控制、信号产生、

信号采集、信号处理和数据存储模块。发射时,信号产生模块负责产生中频 1.8 GHz、带宽 320 MHz 及脉宽 5 μ s 的线性调频信号,发送至微波收发信道。接收时,信号处理器上的 AD 以 2.4 GHz 采样频率对微波收发信道发来的中频信号进行采集,将单路模拟电平信号转化为数字信号,在 FPGA 中进行 6 抽 1、IQ 解调和量化,生成 IQ 两路、位宽 8 bit 的数据流,与组合惯导数据组帧后发送至数据存储模块,每帧数据为 4 096 点,对应的采样窗宽为 10 μ s。

4) 结构设计

相控阵海浪波谱仪一般安装在机腹下方,需考虑飞机震动,以及高集成度、密闭腔体内热耗的影响,雷达外壳结构作为主框架,相控阵天线安装在整机结构前端,前部通过天线罩实现保护以及密封;信道采用无缆化设计直接和天线对插;系统控制与信号处理板直接贴合在整机外壳的后壁内侧,在设计结构强度、刚度的同时,在壳体设计大面积散热翅片,进行力、热一体化设计,实现雷达整机结构尺寸 120 mm $\times$ 140 mm $\times$ 150 mm,整机重量 3 kg。

1.4 工作时序及波位设计

时序设计上,每个宏周期包括 5 个波位,入射角分别为 {0 $^\circ$ 、10 $^\circ$ 、15 $^\circ$ 、10 $^\circ$ 、15 $^\circ$ },以机头方向为方位角 0 $^\circ$,逆时针旋转为正,4 个非机下点波束的起始方位角分别为 {-86.25 $^\circ$ 、3.75 $^\circ$ 、93.75 $^\circ$ 、183.75 $^\circ$ },且方位角均按照 1.875 $^\circ$ 步进。依次循环 96 个周期完成 360 $^\circ$ 方位角的扫描,每圈总时长约 49.35 s,波位设计时序如图 4 所示,初始波位方位角如表 2 所示。采用脉宽 5 μ s,固定重频 5 000 Hz,每个波位的驻留时间可设置为 0.2~102 ms。

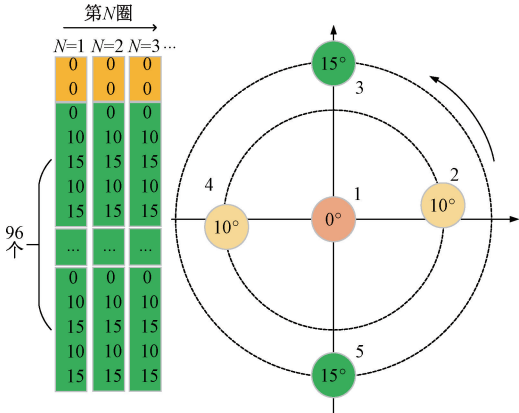


图4 波位设计

Fig. 4 The design of beam position

表2 初始波位设计

Table 2 Original azimuth of different elvation (°)					
入射角	0	10	15	10	15
起始方位角	0	-86.25	3.75	93.75	183.75

2 渤海飞行试验介绍

2023 年 5~7 月,在秦皇岛附近的渤海海域,搭载运-12 飞机,开展了相控阵海浪波谱仪飞行试验,在试验海域布设了同步观测浮标,获取了 3 个架次的雷达回波数据及同步浮标观测数据。

2.1 试验设备

试验设备为北京遥测技术研究所自研相控阵海浪波谱仪样机,如图 5 所示。陪试设备为波浪骑士浮标和全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)浮标,如图 6 所示。



图5 相控阵海浪波谱仪

Fig. 5 Phased-array wave spectrometer

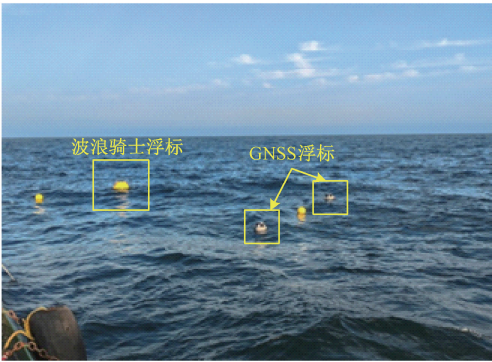


图6 波浪骑士浮标和GNSS浮标

Fig. 6 WAVERIDER and GNSS buoys

2.2 试验条件

观测海域选择秦皇岛市附近的渤海海域,水深大于 20 m。根据空域条件,飞行航线设计为 40 km $\times$ 20 km 矩形和 20 km $\times$ 10 km 矩形航线,可从多个方向观测海浪,航线设计如图 7 所示,试验条件如表 3 所示。

3 试验与结果分析

试验数据处理主要是对飞行试验中采集、记录的原

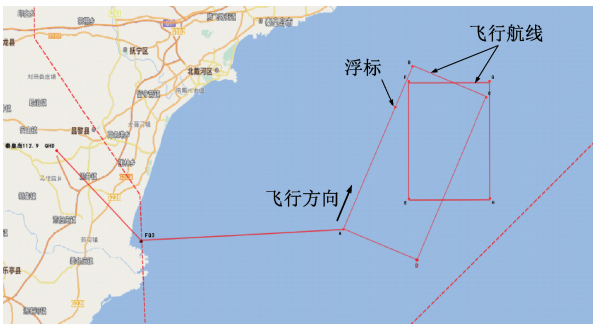


图 7 航线设计
Fig. 7 Design of the flying route

表 3 试验条件
Table 3 Experiment conditions

飞行架次	试验时间	天气	有效波高/m(浮标数据)	浮标布放情况	试验目的
20230528 架次	2023 年 5 月 28 日 17:00~21:30	晴	0.2	GNSS 浮标	检飞
20230617 架次	2023 年 6 月 17 日 19:00~23:00	晴	0.6	GNSS 浮标	海浪谱同步观测
20230714 架次	2023 年 7 月 14 日 20:00~24:00	晴	1.0	GNSS 浮标、波浪骑士浮标	海浪谱同步观测

浪谱反演等,可机上实时输出海浪谱产品,这将在后续试验中进行实现。

3.1 海面后向散射系数 σ^0 计算

相控阵海浪波谱仪观测海浪,需要假设观测范围内的海面是均匀的,其最小分辨单元是对应 1 个距离门的圆环形条带,在单个脉冲观测中,雷达所采集的回波功率序列是关于斜距的函数,每个回波功率点都是对海面上一个距离条带内被天线方向图加权的海面 σ^0 积分的结果,因为条带宽度很窄,例如,在 $5^\circ \sim 15^\circ$ 入射角时,为 $1 \sim 4$ m,可以认为该条带内的海面后向散射系数、斜距是常量,因此计算 σ^0 的雷达方程可以表示为:

$$P_r(r) = \frac{P_t \lambda^2 \sigma^0(r)}{(4\pi)^3 r^4 L_s} \int_{r' \in \left[\frac{-\delta_r}{2}, \frac{\delta_r}{2} \right]} \int_{\varphi \in [0, 2\pi]} G^2(\theta(r'), \varphi) ds + N_T$$

(3)

式中: P_t 是相控阵海浪波谱仪峰值发射功率; P_r 是雷达接收回波功率; λ 是电磁波波长; r 是雷达斜距; L_s 是雷达系统损耗; δ_r 是雷达距离门; θ 是入射角; φ 是方位角; N_T 是热噪声。其中,积分项仅与天线方向图、入射角和方位角有关,定义该积分项为照射积分因子 $G_{\theta\varphi}$, σ^0 公式为:

$$\sigma^0(r) = \frac{[P_r(r) - N_T] (4\pi)^3 r^4 L_s}{P_t \lambda^2 G_{\theta\varphi}(\theta, r, rol, pit)}$$

(4)

其中, N_T 由回波直接计算,由于海面回波形状具有明显特征,会在机下点附近形成一个陡峭的上升沿,随着入射角增大和斜距增加,远处的海面回波能量逐渐减小,形成下降沿,将回波采样窗口上升沿前的 256 点平均后

始回波数据进行事后处理和分析。本文选取 10° 波束数据处理结果进行分析。首先,对回波信号进行匹配脉压和热噪声补偿;然后,利用回波波形的上升沿半功率点计算飞机相对于海平面的高度,用于入射角计算;然后,根据雷达方程和天线方向图计算后向散射系数和调制函数^[15];由式(2)可知,调制谱与调制函数的自相关函数是一对傅里叶变换对,由此可得调制谱,进而得到海浪谱。

试验中采用的信号处理板卡是 FPGA+DSP 架构,包含 2 GB DDR。若采用 FPGA 进行数字下变频、抽取、距离脉压,DSP 进行方位脉冲积累、后向散射系数计算、海

作为热噪声功率。照射积分因子 $G_{\theta\varphi}$ 通过微波暗室测量天线方向图进行计算,还需要考虑飞机横滚角、俯仰角对照射积分的影响,由于海面条带是按照距离门来划分的,天线方向图随着姿态变化在海面上滑动,使不同的海面条带被加权,这可以在计算照射积分时,将飞机坐标系转换到东北天坐标系实现。 $G_{\theta\varphi}$ 受到 4 个变量的影响,分别是入射角 θ 、方位角 φ 、横滚角 rol 、俯仰角 pit ^[17],可表示为 $G_{\theta\varphi}(\theta, \varphi, rol, pit)$ 。飞行试验前,在微波暗室测量以方位角步进 15° ,入射角 10° ,测量了三维天线方向图,生成的 $G_{\theta\varphi}(10, \varphi, 0, 0)$ 如图 8 所示。

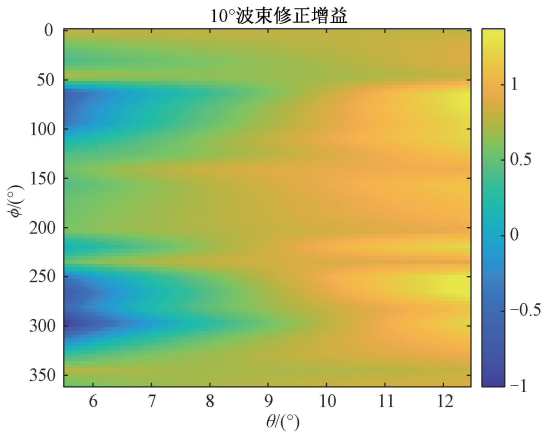


图 8 照射积分因子
Fig. 8 Integrated radiation factor

海面回波功率(图 9)通过方向图校正后得到后向散射系数结果(图 10),方位角以飞机坐标系作为参考,机头方向为 0° 。

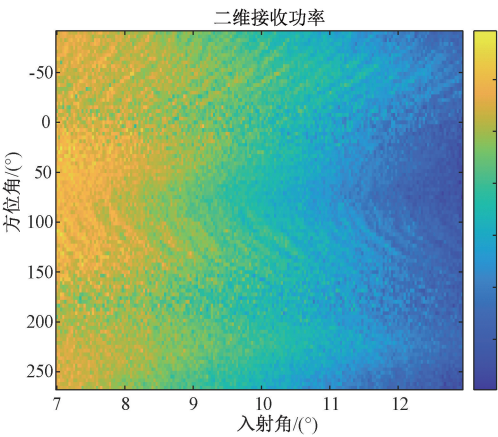


图 9 海面回波功率

Fig. 9 Sea surface echo power

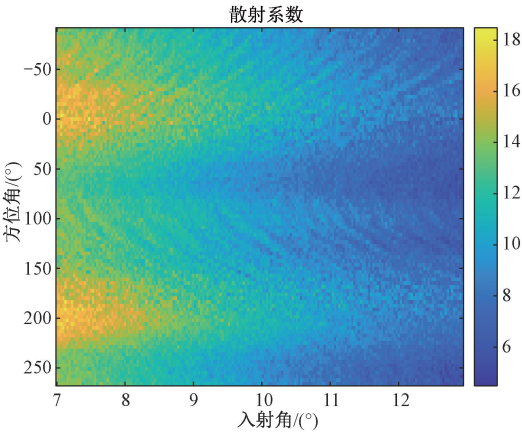


图 10 海面后向散射系数

Fig. 10 Sea surface backscattering coefficient

3.2 斑点噪声去除效果

在试验中,飞行航向与波浪传播方向一致(波浪方向依据海浪模式预报及同步浮标数据),采用动态波位驻留时序,进行海面观测,经过地面数据处理和反演^[18-20],结果表明,当沿航向驻留时间为 25.6 ms 时,波浪能量被斑点噪声淹没,如图 11(a)所示,驻留时间设置为 102 ms 时,沿航向的信斑比从-6 dB 提升到 3 dB,波浪能量显著提升,如图 11(b)所示,验证了动态波位驻留时间技术可有效提高沿航向信斑比。其中,半径表示波浪频率,幅度表示波浪能量 $S(f, \phi)$ 。

3.3 与浮标结果比对

20230617 架次选取海浪波谱仪和浮标观测时间与位置匹配的数据进行对比分析,结果如图 12 和表 4 所示,其中,半径表示波浪频率,幅度表示波浪能量 $S(f, \phi)$ 。相较于图 12(b),图 12(a)中由海浪波谱仪探测处理得到的海浪谱能量分布更为集中,波浪方向展宽

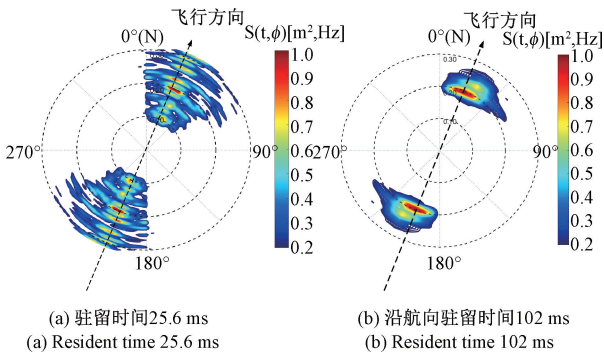


图 11 动态波位驻留时间对斑点噪声的抑制效果

Fig. 11 Dynamic beam resident time for along-tack speckle noise suppression

较小,由此计算得到的主波向、主频率(主波长)和有效波高与 GNSS 浮标相应海浪参数相差分别为 -1.5° 、 0.01 Hz (-3.41 m) 和 0.03 m 。

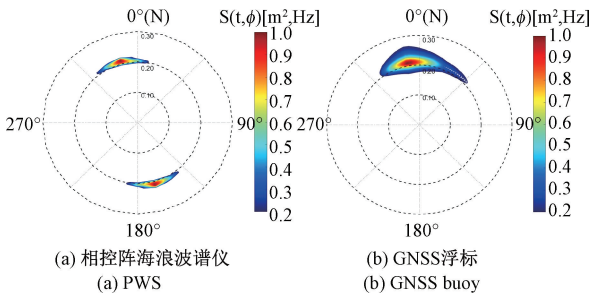


图 12 20230617 架次海浪谱结果

Fig. 12 Wave spectra result of flight-20230617

表 4 20230617 架次同步观测结果对比

Table 4 Synchronous comparison of flight-20230617

设备名称	相控阵海浪波谱仪	GNSS 浮标
数据积累时间/min	0.2	30
观测单元/km	1×2	定点
时间	2023 年 06 月 17 日 20:58	2023 年 06 月 17 日 20:50
经纬度	E119°52.29' N39°39.57'	E119°54.36' N39°43.38'
主波向/(°)	346.5°	348°
主波频率/Hz	0.21	0.20
主波长/m	35.49	38.9
有效波高/m	0.72	0.69

20230714 架次选取海浪波谱仪和浮标观测时间与位置匹配的数据进行对比分析,结果如图 13 和表 5 所示,其中,半径表示波浪频率,幅度为波浪能量 $\lg S(f, \phi)$ 。

由图 13(b)可知,20230714 架次探测的海面区域内波浪组成情况较为复杂,主波浪成分明显,但该波浪成分出现 180°波向模糊现象。如图 13(a)所示,海浪波谱仪在探测此海面区域时,主波向也较为明显,但主波浪方向展宽严重;主波浪方向展宽严重可能是由于该海面区域海况复杂引起。而从表 5 可以看出,由海浪波谱仪探测反演的主波向、主频率(主波长)和有效波高与 GNSS 浮标提供的相应海浪参数相差分别为 14°、0.014 Hz(−1.05 m)和−0.23 m。可见,主波浪方向展宽对主波向的计算产生了极大影响。以上两组海浪波谱仪与相应匹配的 GNSS 浮标海浪谱及相应海浪参数的对比一定程度上证明了相控阵海浪波谱仪海浪探测的能力。

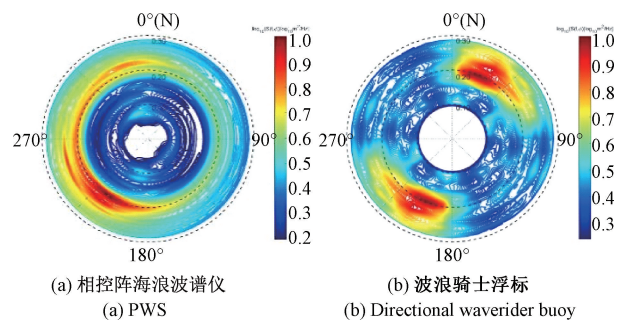


图 13 20230714 架次海浪谱结果
Fig. 13 Wave spectra results of flight-20230714

表 5 20230714 架次同步观测对比

Table 5 Synchronous comparison of flight-20230714		
设备名称	相控阵海浪波谱仪	波浪骑士浮标
数据积累时间/min	0.8	30
观测单元/km	1×2	定点
观测时间	2023 年 07 月	2023 年 07 月
	14 日 21:30	14 日 21:38
经纬度	E119°54'25"	E119°56'49"
	N39°43'24"	N39°54'44"
主波向/(°)	226°	240°
主波频率/Hz	0.211	0.225
主波长/m	32	30.95
有效波高/m	1.25	1.02

4 结 论

本文在秦皇岛附近的渤海海域,开展了相控阵海浪波谱仪飞行试验,与同步浮标观测数据进行对比,可得,相控阵海浪波谱仪波向测量精度优于 15°,波长测量精度优于 10%,有效波高测量精度优于 0.3 m,证明了相控圆

锥扫描体制获取海面回波、反演海浪谱的性能。同时,验证了动态波位驻留对沿航向斑点噪声的抑制能力,可使沿航向信斑比从−6 dB 提升至 3 dB。

本文基于机载相控阵海浪波谱仪,实现了海面后向散射系数和海浪谱主动微波遥感观测。一方面,采用基于二维相控阵雷达的动态波位驻留时序设计,提高沿航向斑点噪声抑制水平,使观测效能得到提升。另一方面,采用电子扫描,无旋转机构,可大幅度提升波谱仪设备的紧凑性、适装性和可靠性,雷达整机结构尺寸 120 mm×140 mm×150 mm,整机重量小于 3 kg,提高了机载平台适应能力。但是,该雷达系统还未考虑内定标和外定标校正,因此在后向散射系数和海浪谱生产时采用浮标数据结果进行了幅度标定,系统定标工作将是后续工作重点。

参考文献

[1] 刘建强, 蒋兴伟, 郎姝燕, 等. 中法海洋卫星及其典型应用[J]. 卫星应用, 2021(9): 41-48.
LIU J Q, JIANG X W, LANG SH Y, et al. Chinese and French Marine satellites and their typical applications[J]. Satellite Application, 2021(9): 04-48.
[2] CAO L, HOU Y J, QI P. Altimeter significant wave height data assimilation in the South China Sea using the ensemble optimal interpolation[J]. Chinses Journal of Oceanology and Limnology, 2016, 54(1): 287-297.
[3] AOUF L, HAUSER D, BERTRAND C, et al. New directional wave satellite observations; Towards improved wave forecasts and climate description in southern ocean[J]. Geophysical Research Letters, 2021(48): e2020GL091187.
[4] 杨乐. 卫星雷达高度计在中国近海及高海况下遥感反演算法研究[D]. 南京:南京理工大学, 2009.
YANG L. Study on satellite radar altimeter retrieval algorithms over coastal seas and under high sea state events[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
[5] 李晓明. ENVISAT 卫星 ASAR 波模式数据海浪反演算法研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2010.
LI X M. Study of algorithms for ocean wave retrieval using ENVISAT advanced synthetic aperture radar wave mode data[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
[6] 周波, 石爱国, 蔡烽, 等. 海浪方向谱的数据测量和估计方法[J]. 舰船科学技术, 2005, 27(2): 46-49.
ZHOU B, SHI AI G, CAI F, et al. Measurement and estimation methods of wave directional spectrum[J].

- Ship Science and Technology, 2005, 27(2): 46-49.
- [7] HAUSER D, TOURAIN C, HERMOZO L, et al. New observations from the swim radar on-board cfoSat: Instrument validation and ocean wave measurement assessment[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(1): 5-26.
- [8] 刘建强, 叶小敏, 兰友国. 我国海洋卫星遥感大数据及其应用服务[J]. 大数据, 2022, 8(2): 75-88.
LIU J Q, YE X M, LAN W G. China's marine satellite remote sensing big data and its application services[J]. Big Data Research, 2022, 8(2): 75-88.
- [9] 江涛. 自主海洋卫星数据精度验证及台风浪数值模拟中的运用[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
JIANG T. Application in the accuracy verification of autonomous ocean satellite data and the numerical simulation of typhoon waves [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.
- [10] CHEN P, HAUSER D, ZOU S, et al. Speckle noise spectrum at near-nadir incidence angles for a time-varying sea surface [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022(60): 1-20.
- [11] JACKSON F C, WALTON W T, HINES D E, et al. Sea surface mean square slope from Ku-band backscatter data[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1992, 97(C7): 11411-11427.
- [12] 储小青. 海浪波谱仪海浪遥感方法及应用基础研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2011.
CHU X Q. The algorithm and applied basic study on remote sensing of ocean wave spectrum for ocean wave spectrometer[D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [13] HAUSER D, SOUSSI E, THOUVENOT E, et al. SWIMSAT: A real-aperture radar to measure directional spectra of ocean waves from space-main characteristics and performance simulation. [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2001, 18(3): 421-421.
- [14] JACKSON F C. An analysis of short pulse and dual frequency radar techniques for measuring ocean wave spectra from satellites [J]. Radio Science, 1981, 16(6): 1385-1400.
- [15] HAUSER D, CAUDAL G C, RIJCKENBERG G J, et al. RESSAC: A new airborne FM/CW radar ocean wave spectrometer[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(5): 981-995.
- [16] JACKSON F C, WALTON W T, BAKER P L. Aircraft and satellite measurement of ocean wave directional spectra using scanning-beam microwave radars [J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 1985, 90(C1): 987-1004.
- [17] LI X, HE Y, ZHANG B, et al. The construction of a three-dimensional antenna gain matrix and its impact on retrieving sea surface mean square slope based on aircraft wave spectrometer data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2016, 33(4): 847-856.
- [18] CAUDAL G, HAUSER D, VALENTIN R, et al. KuROS: A new airborne ku-band doppler radar for observation of surfaces [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(10): 2223-2245.
- [19] 韩倩倩, 李凉海, 史留保, 等. 基于实测数据的机载海洋波谱仪反演算法研究 [J]. 遥测遥控, 2012, 33(3): 31-36.
HAN Q Q, LI L H, SHI L B, et al. Research on inversion algorithm of airborne ocean spectrometer based on measured data [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2012, 33(3): 31-36.
- [20] 韩倩倩, 张振华, 孟俊敏, 等. 机载海洋波谱仪回波数据处理方法研究 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(2): 116-121.
HAN Q Q, ZHANG ZH H, MENG J M, et al. Research on processing method of the airborne ocean wave spectrometer data [J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(2): 116-121.

作者简介



江柏森, 2002 年于北京理工大学获得学士学位, 2005 年于北京理工大学获得硕士学位, 现为北京遥测技术研究所微波遥感技术研究室主任、自然资源部海洋遥测技术创新中心成员, 主要研究方向为气象海洋环境微波遥感技术。

E-mail: jiangbosen2012@163.com

Jiang Bosen received his B.Sc. degree and M.Sc. degree both from Beijing Institute of Technology in 2002 and 2005, respectively. He is currently the director of Microwave Remote Sensing Technology Research Office at Beijing Research Institute of Telemetry and a member of Marine Telemetry Innovation Center of Ministry of Natural Resources. His main research interests include microwave remote sensing technology of meteorological and marine environment.



韩倩倩 (通信作者), 2009 年于中北大学获得学士学位, 2012 年于中国运载火箭技术研究院获得硕士学位, 现为北京遥测技术研究所高级工程师、自然资源部海洋遥测技术创新中心成员, 主要研究方向是海洋微波主动遥感雷达系统设计。

E-mail: hanqian8814@126.com

Han Qianqian (Corresponding author) received her B. Sc. degree from North University of China in 2009, and M. Sc. degree from China Academy of Launch Vehicle Technology in 2012. She is currently a senior engineer at Beijing Research Institute of Telemetry and a member of Marine Telemetry Innovation Center of Ministry of Natural Resources. Her main research interest is the system design of marine microwave active remote sensing radar.



曹蕾, 2011 年于南京信息工程大学获得学士学位, 2016 年于中国科学院大学获得博士学位, 现为北京遥测技术研究所高级工程师、自然资源部海洋遥测技术创新中心成员, 主要研究方向为气象海洋环境微波遥感。

E-mail: winnycl@163.com

Cao Lei received her B. Sc. degree from Nanjing University of Information Science and Technology in 2011, and Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2016. She is currently a senior engineer at Beijing Research Institute of Telemetry and a member of Marine Telemetry Innovation Center of Ministry of Natural Resources. Her main research interest is microwave remote sensing of meteorological and marine

environment.



张晰, 2005 年于青岛科技大学获得学士学位, 2008 年于中国海洋大学获得硕士学位, 2011 年于中国海洋大学获得博士学位, 现为自然资源部第一海洋研究所研究员、自然资源部海洋遥测技术创新中心成员, 主要研究方向为海洋微波遥感。

E-mail: xi.zhang@fio.org.cn

Zhang Xi received his B. Sc. degree from Qingdao University of Science and Technology in 2005, M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Ocean University of China in 2008 and 2011, respectively. He is currently a researcher at the First Institute of Oceanography of Ministry of Natural Resources and a member of Marine Telemetry Innovation Center of Ministry of Natural Resources. His main research interest is marine microwave remote sensing.



叶洪玲, 2020 年于武汉理工大学获得学士学位, 2023 年于华中科技大学获得硕士学位, 现为北京遥测技术研究所微波遥感技术研究室助理工程师, 主要研究方向为海浪波谱仪数据反演。

E-mail: yell608@163.com

Ye Hongling received her B. Sc. degree from Wuhan University of Technology in 2020, and M. Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2023. She is currently an assistant engineer of Microwave Remote Sensing Technology Research Office at Beijing Research Institute of Telemetry. Her main research interests include the data inversion of ocean wave spectrometer.