

基于粒子群算法的相控阵海浪波谱仪天线增益校正方法

谢天壹¹, 韩倩倩², 苗洪利¹, 曹 蕾², 江柏森², 张振华²

(1 中国海洋大学 青岛 266100;

2 北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 相控阵海浪波谱仪是一个 Ku 波段真实孔径雷达, 通过在小入射角下照射海面, 接收海面回波功率, 并去除雷达 EIRP (Effective Isotropically Radiated Power, 等效全向辐射功率)、天线方向图、系统损耗等雷达自身的影响因子, 获取海面三维信息。这些影响因子可以在微波暗室中测量, 其中 EIRP、系统损耗可认为是常数量, 但是, 天线方向图是与入射角、方位角相关的三维变量, 测量受到暗室系统精度的限制, 并且, 相控阵海浪波谱仪最小处理单元是雷达照亮的圆环形条带, 照射的过程即是对该环形条带中的变量进行二维积分, 成为一个随入射角变化的后向散射系数剖面, 因此, 天线方向图的微小误差, 都会对海面后向散射系数剖面形状产生显著影响, 出现“凹现象”问题。针对该问题, 本文基于粒子群算法进行了积分天线增益的校正工作, 利用机载飞行试验数据进行了算法验证, 通过与同步观测浮标海浪测量结果对比, 表明本算法可有效改善“凹现象”, 使回波数据有效率提升了 12%, 为业务化的波浪谱生产提供了技术支撑。

关键词: 微波遥感; 照射积分; 天线方向图; 散射系数

中图分类号: V556.1; TN953

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2024)01-0116-10

DOI: 10.12347/j.ycyk.20231103001

引用格式: 谢天壹, 韩倩倩, 苗洪利, 等. 基于粒子群算法的相控阵海浪波谱仪天线增益校正方法[J]. 遥测遥控, 2024, 45(1): 116-125.

Antenna Gain Calibration Method for Phased Array Wave Spectrometer Based on Particle Swarm Algorithm

XIE Tianyi¹, HAN Qianqian², MIAO Hongli¹, CAO Lei², JIANG Bosen², ZHANG Zhenhua²

(1. Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: The phased array wave spectrometer is a Ku-band real aperture radar that illuminates the sea surface at small incidence angles to receive sea surface echo power. It extracts three-dimensional sea surface information by removing radar-related factors like EIRP (Effective Isotropically Radiated Power), antenna patterns, and system loss, which can be measured in a microwave anechoic chamber. However, the antenna pattern's precision is limited, leading to the 'concave' anomaly in the backscatter coefficient profile that hinders wave spectrum inversion. To address this, the paper uses particle swarm optimization to correct integral antenna gain. Validation with flight test data shows a 12% improvement in data reliability, supporting operational wave spectrum production.

Keywords: Microwave remote sensing; Irradiated Integral; Antenna pattern; Backscatter coefficient

Citation: XIE Tianyi, HAN Qianqian, MIAO Hongli, et al. Antenna Gain Calibration Method for Phased Array Wave Spectrometer Based on Particle Swarm Algorithm[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(1): 116-125.

0 引言

随着雷达技术的发展, 雷达已被应用于海浪的方向谱测量^[1]。这种类型的雷达与合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 系统有所不同, 它

无法直接获取海面图像, 而是通过使用调频连续波 (Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW) 技术实现与 SAR 相同水平的距离分辨率。几年前国外开发了用于海洋波浪测量的机载真实孔径雷达, 例如由美国开发的海洋波谱仪 ROWS (Radar

Ocean Waves Spectrom) [2], 欧洲空间局 (European Space Agency, ESA) 和法国国家航天局开发的海洋波谱仪 RESSAC (Radar pour l' Etude du Spectre de Surface par Analyse Circulaire) [3], 以及源自 RESSAC 的海洋观测雷达系统 STORM (Systeme de Teledetection pour l' Observation Radar de la Mer) [4,5]。

2018年, 中法海洋卫星 (China-France Oceanography Satellite, CFOSAT) 携带着名为 SWIM (Surface Waves Investigation and Monitoring) 的海洋波谱仪, 旨在从太空中测量海浪的方向谱[6]。SWIM是一个Ku波段的真实孔径雷达[7], 入射角范围从 0° ~ 10° 。为了获得二维海浪谱, 该雷达被设计成在不同方位上通过天线旋转, 以小入射角测量电磁回波。从海浪谱中可以获取波峰、波长、波向和有效波高等信息。2021年3月, 法方在法国国家空间研究中心 (National Centre for Space Studies, CNES) 星载海洋波谱仪讨论会中提到了SWIM在轨数据中出现的一种现象, 即反演出的海面后向散射系数剖面形状在某些方位存在“凹现象”, 原因是暗室测量的天线方向图的指向精度不够, 这种误差会影响海浪谱反演的精度, 因此必须校正这种误差才能获取趋势正确的后向散射系数。

2016年, 李秀仲等[8]人提出了根据机载平台的误指向角建立高维度矩阵查找表的方式优化积分增益,使海面均方根斜率MSS (Mean Square Slope) 曲线周期性更加规律。

2021年, 法国国家空间研究中心星载海洋波谱仪讨论会上, Laura Hermozo等人就后向散射系数校正问题提供了解决方案, 可以通过建立代价函数利用迭代算法修正天线方向图积分因子, 从而解决后向散射系数剖线的非二次多项式趋势。

星载海浪波谱仪将是我国首部自主研发的可长时间连续工作的波浪谱遥感仪器, 不同于SWIM的机械扫描, 星载海浪波谱仪采用相控阵的方式获取 360° 方位向的海面信息。为了验证相控阵扫描方式在海面回波数据获取性能以及SWIM出现的散射系数“凹现象”问题, 北京遥测技术研究所2023年6月于渤海附近开展机载飞行试验, 实验中发现, 反演出的海面后向散射系数剖面形状同样存在“凹现象”。本文针对以上问题提出一种基于最优化算法的天线方向图校正方法, 并完成

验证, 更好地消除天线方向图测量精度不足对后向散射系数剖面产生的影响。

1 相控阵海浪波谱仪探测原理

1.1 海浪探测原理

相控阵海浪波谱仪属于微波传感器, 在小入射角范围内工作, 海面散射主要表现为准镜面散射[9], 雷达的后向散射可表示为:

$$\sigma^0(\theta, \phi) = \frac{|R(0)|^2 \pi}{\cos^4 \theta} \cdot p(z_x, z_y) \quad (1)$$

式中, θ 为入射角, ϕ 为方位角, $R(0)$ 为 Fresnel 反射系数, $p(z_x, z_y)$ 为海浪斜率在距离向分量和方位向分量 z_x 和 z_y 的联合概率密度函数[11]。

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。相控阵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3至5倍的短波直接贡献[10]。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, 可以忽略水动力调制, 而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。简而言之, 相控阵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, 从而实现对海面散射的有效测量。

1.2 相控阵海浪波谱仪工作原理

相控阵海浪波谱仪与SWIM的旋转机械扫描方式不同, 相控阵海浪波谱仪通过移相器改变各个阵元的相位控制波束的指向以及各个波位的驻留时间, 即非均匀扫描, 保证不同方位角上的信噪比保持稳定。如图1所示。

图1中, 左图表示当波浪局地倾斜使得波峰对准雷达时, 海面回波强, 接收到的信号强度大于平均值。反之, 当波浪局地倾斜[10]使得波峰偏离雷达时, 信号被散射, 海面回波弱, 接收到的散射信号强度小于平均值。这种信号的变化与局地海浪倾斜密切相关。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。右图为相控阵海浪波谱仪观测几何, X 方向为视场方向, 即距离向, Y 垂直于视场方向称为方位向, 实际雷达信号是方位向加权平均, G 为在笛卡尔坐标系下的天

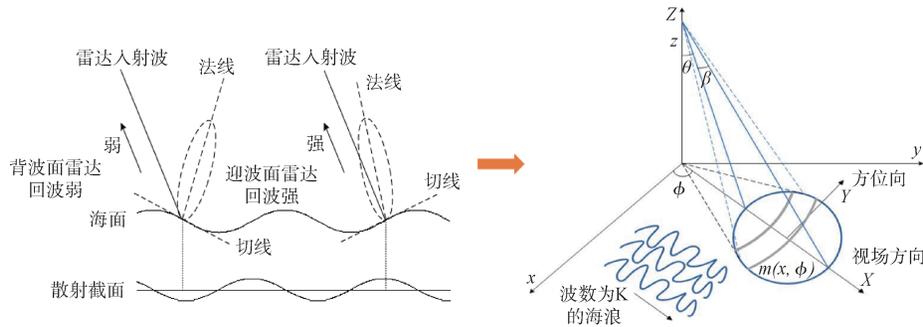


图 1 相控阵海浪波谱仪工作机理

Fig. 1 Working mechanism of phased-array wave spectrometer

线增益, 在视场方向下距离 x 处的调制函数 $m(x, \phi)$ 为:

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

其中, $\frac{\partial \sigma}{\sigma}$ 表示单个面元内的散射截面变化, 参数 α 与入射角度有关^[11], 上式 $m(x, \phi)$ 自相关函数的傅里叶变换记作信号调制谱 $P_m(k, \phi)$, 即:

$$P_m(k, \phi) = \frac{1}{2\pi} \int \langle m(x, \phi), m(x + \zeta, \phi) \rangle \exp(-ik\zeta) d\zeta \quad (3)$$

相控阵海浪波谱仪的接收功率是从不同斜距划分的距离单元 (距离门) 中获取的, 每个距离门单元都叠加了斜距、热噪声以及天线方向图加权的影响^[12]. 在接收到反射功率后为了获得海浪的归一化散射系数 (NRCS), 需要通过雷达方程计算正确的天线增益。

相控阵海浪波谱仪获取的接收功率为:

$$P_r(r) = \frac{P_e \lambda^2 \sigma_0(r) G_{ins} G(r) + N_T}{(4\pi)^3 r^4 L_{propa}} \quad (4)$$

其中, P_e 为发射功率, λ 为波长, $\sigma_0(r)$ 为后向散射系数, G_{ins} 为仪器增益, r 为斜距, L_{propa} 为系统损耗。

$$G(r) = \int_{r \in [-\frac{\Delta r}{2}, \frac{\Delta r}{2}]} \int_{\phi \in [0, 2\pi]} G_T(\theta, \phi) G_R(\theta, \phi) dS \quad (5)$$

其中, θ 为雷达波束入射角, r 为按距离门划分的雷达斜距, S 为海面微分面元, 因此海面后向散射系数为:

$$\sigma_0(r) = \frac{(P_r(r) - N_T)(4\pi)^3 r^4 L_{propa}}{G(r) G_{ins} P_e \lambda^2} \quad (6)$$

2 基于优化算法的散射系数幅度校正方法

2.1 问题提出

相控阵海浪波谱仪通过照射海面, 接收被长

波调制的海面回波功率, 并去除雷达 EIRP、天线方向图、系统损耗等雷达自身的影响因子, 获取海面后向散射系数, 反演海浪谱, 提取海浪的波长、波向、有效波高的三维信息。这些影响因子可以在微波暗室中测量, 图 2 为暗室实测二维天线方向图。

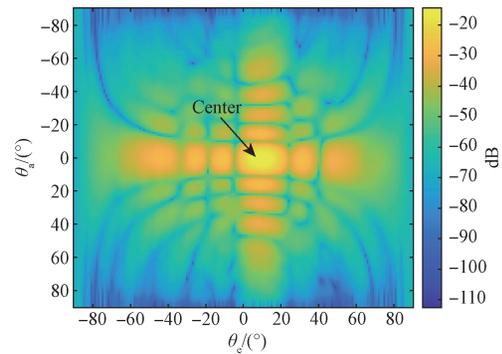


图 2 暗室实测二维天线方向图

Fig. 2 Empirical measurement of two-dimensional antenna radiation pattern in a darkroom

二维天线方向图基于球坐标系建立的, 角度分辨率为 1° , 图中幅值最大的位置为波束中心指向, 按照雷达距离门对该方向图进行积分得到的结果称为增益积分因子, 积分过程如图 3 所示。

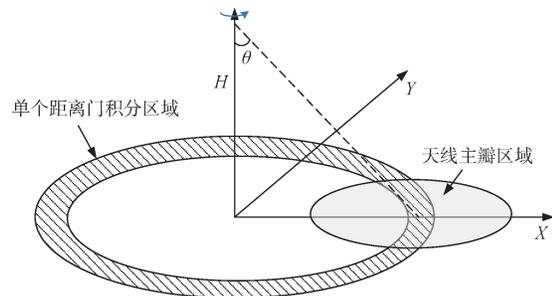


图 3 条带积分示意图

Fig. 3 Strip integration schematic diagram

校正天线积分增益后,海面的理论的散射系数趋势应该与入射角呈现二次多项式的关系,不同风速下其趋势不同^[13],如图4所示。

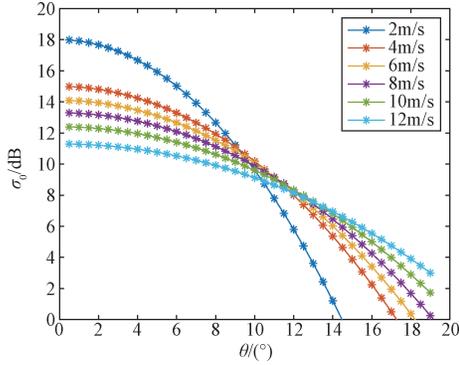


图4 理论海面后向散射系数趋势

Fig. 4 Trends in theoretical backscatter coefficients from the sea surface

而由于平台的姿态(俯仰、横滚、偏航角)带来的误指向角和天线方向图测量精度不足,会影响积分因子的计算结果,从而影响散射系数结果,其中误指向角 θ_{Mis} 的定义为:

$$\theta_{Mis} = \sqrt{roll^2 + pitch^2} \quad (7)$$

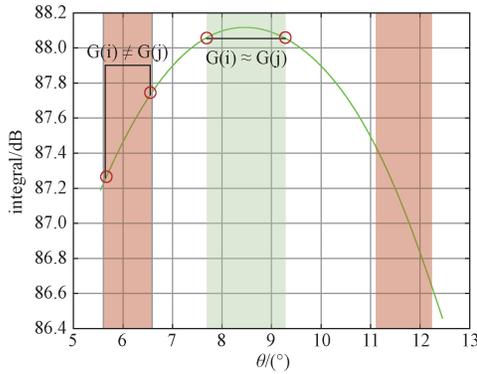


图5 天线积分增益随入射角变化

Fig. 5 The antenna integral gain varies with incident angle

从图5中可以看出,当入射角在波束中心附近时积分增益幅度变化不大,而在波束边缘处时,1°的入射角变化可能导致1 dB以上的幅度变化,因此在波束中心位置产生的误差小,在波束两端产生的误差大,这将导致在某些方位向上出现散射系数上凹问题,如图6所示。

图6为实测数据中反演的海面后向散射系数随入射角变化的关系,图中后向散射系数存在上文提到的“凹现象”,该现象会影响后续的海浪反演,由此可见天线方向图精度对后向散射系数的

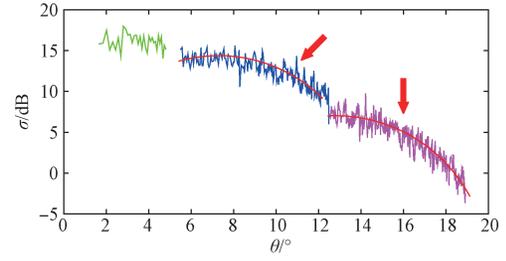


图6 积分增益导致的散射系数上凹问题

Fig. 6 The concave-upward issue in scattering coefficients caused by integral gain

影响不能忽略,因此需要设计一种方法校正积分增益改善散射系数的变化趋势。

2.2 传统散射系数幅度校正方法

平台姿态产生的误指向角是影响天线积分增益的因素之一,因此可以利用安装在平台上的惯导系统将同时记录三个姿态角(俯仰角、横滚角、偏航角)。平台姿态角、波束入射角和方位角共同决定了波束中心的指向,因此可以通过校正姿态角来得到正确的波束指向,其中俯仰角、横滚角、偏航角的变换矩阵分别为:

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos p & -\sin p \\ 0 & \sin p & \cos p \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos r & 0 & \sin r \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin r & 0 & \cos r \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos y & -\sin y & 0 \\ \sin y & \cos y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

设笛卡尔坐标系下的理想波束指向为 \vec{V} ,采用213旋转顺序,则有姿态角下的波束指向为:

$$\vec{V}_0 = R_z R_x R_y V \quad (11)$$

实际的暗室的二维天线方向图是在球坐标系下测量的,相控阵天线安装在机载平台对应的几何关系如图7所示。

图7中平台沿y轴方向飞行,其波束指向可以通过以下两种方式表示:其中 θ_A 和 θ_E 分别为波束俯仰角和方位角; ϕ 和 θ 分别为笛卡尔坐标系下的方位角和入射角,由几何关系可得,二者之间存在转换关系如下:

$$\begin{aligned} \theta_A &= \arctan(\tan(\theta)\cos(\phi)) \\ \theta_E &= \arcsin(\sin(\theta)\sin(\phi)) \end{aligned} \quad (12)$$

当产生误指向角时,实际的球坐标系入射角

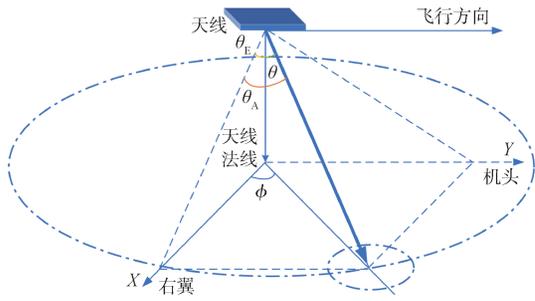


图 7 机载飞行几何

Fig.7 The flight geometry definition

和方位角角度分别为:

$$\begin{aligned}\theta'_A &= \arctan(\tan(\theta)\cos(\phi)) + \theta_{\text{pit}} \\ \theta'_E &= \arcsin(\sin(\theta)\sin(\phi)) + \theta_{\text{rot}}\end{aligned}\quad (13)$$

将波束中心平移到正确的指向, 获取更为准确的发射/接收二维天线方向图 $G_r(\theta, \phi)$ 和 $G_r(\theta, \phi)$, 二维积分增益矩阵中的 n 值与暗室测量的角度步进有关, 当测量范围选取 $\pm 90^\circ$, 步进为 0.1° 时, G_{TR} 为 1801×1801 的矩阵。

$$G_{TR} = \begin{bmatrix} G(A1, E1) & G(A2, E1) & \dots & G(An, E1) \\ G(A1, E2) & G(A2, E2) & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ G(A1, En) & \dots & \dots & G(An, En) \end{bmatrix} \quad (14)$$

此时天线实际指向在球坐标系下为

$$\begin{aligned}\theta_{rel} &= \arccos(\cos(\theta'_E)\cos(\theta'_A)) \\ \phi_{rel} &= \arctan(\tan(\theta'_A)/\sin(\theta'_E))\end{aligned}\quad (15)$$

将天线方向图按照天线实际指向去做条带积分, 可以解决姿态导致的误指向问题。但该方法仍然无法校正因天线方向图测量精度不足产生的积分增益问题, 因此还需要找到其他方法校正散射系数曲线随入射角变化的趋势。

2.3 基于粒子群算法的幅度校正方法

2021 年的中法海洋卫星讨论会中, 法方提到: SWIM 在后向散射系数的反演中存在上文提到的问题, 并提供了一种积分增益修正思路: 首先对天线方向图进行插值, 获取更高精度指向角下的幅度, 接着设定波束指向的误差变化范围 (天线俯仰角/方位角), 最后, 按照条带积分方法对每个方向图进行积分构建成一个积分查找表。

$$G_{\text{Table}} = \begin{bmatrix} G(p_1, r_1) & G(p_1, r_2) & \dots & G(p_1, r_3) \\ G(p_2, r_1) & G(p_2, r_2) & \dots & G(p_2, r_3) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ G(p_n, r_1) & G(p_n, r_2) & \dots & G(p_n, r_n) \end{bmatrix} \quad (16)$$

遍历整个查找表进行迭代操作, 核心思路是:

- ① 每次迭代积分增益在散射系数趋势正常时尽量接近测量值;
- ② 散射系数曲线逼近关于入射角的 2 次多项式;
- ③ 尽量消除各个波位散射系数的不连续性;
- ④ 找到满足上述条件下最小的代函数

$$J(\text{gain}) = K_1 \|G_{\text{int_estimated}} - G_{\text{int_measured}}\|^2 + K_2 \|(\sigma_0 - \bar{\sigma}_0) - (\sigma_0^* - \bar{\sigma}_0^*)\|^2 \quad (17)$$

其中, $G_{\text{int_estimated}}$ 是在一定范围内考虑所有误指向情况建立的积分增益查找表, 精度比暗室测量精度更高, 使误指向角能在更小的区间变化, 迭代计算出最符合要求的积分增益, $G_{\text{int_measured}}$ 为该方位角下直接利用所测二维方向图获取的积分增益结果, σ_0 为该方位角下每个波位通过每次迭代的 $G_{\text{int_estimated}}$ 和校正热噪声、距离等参数后的接收回波功率 P 计算出的散射系数值, 即:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{0(1)} \\ \sigma_{0(2)} \\ \sigma_{0(3)} \\ \dots \\ \sigma_{0(n)} \end{bmatrix}_{dB} = \begin{bmatrix} P_{(1)} \\ P_{(2)} \\ P_{(3)} \\ \dots \\ P_{(n)} \end{bmatrix}_{dB} - \begin{bmatrix} G_{\text{int_estimated}(1)} \\ G_{\text{int_estimated}(2)} \\ G_{\text{int_estimated}(3)} \\ \dots \\ G_{\text{int_estimated}(n)} \end{bmatrix}_{dB} \quad (18)$$

$\bar{\sigma}_0$ 为 σ_0 在各个波位的 15° 方位内的均值, σ_0^* 为所有波位散射系数的估计值对入射角正切值进行的二阶拟合, 目的是使得所有波位散射系数校正后的结果与入射角呈二次多项式关系, $\bar{\sigma}_0^*$ 为 σ_0^* 在 15° 方位角的均值, 式中提到了权重系数 K , 需要根据实际情况进行调整, 使得到的代价函数是最优解, 最后利用公式 6 完成后向散射系数的计算。建立的积分增益查找表是一个大数据量的矩阵, 如果逐一代入计算十分占用内存, 而且效率低下。

粒子群优化算法 PSO (Particle Swarm Optimization) 是一种基于群体智能方法的进化计算技术, 是基于可行解范围中的一群初始化随机粒子, 每个粒子都将会成为待解决问题的一个最优解, 对一群随机粒子的初始位置和初始速度不断进行迭代计算, 最终找出最优解^[14], 算法流程图如图 8 所示。

PSO 算法中的粒子代表待解决问题的答案, 其中主要参数见表 1。

粒子在飞行过程中不断更新, 表达式为:

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{\text{best}} - x_{id}^k) + c_2 r_2 (g_{\text{best}} - x_{id}^k) \quad (19)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1}, \quad i = 1, 2, \dots, m; d = 1, 2, \dots, D \quad (20)$$

式中, m 为粒子群规模; D 为粒子群维数; v_{id}^k 为

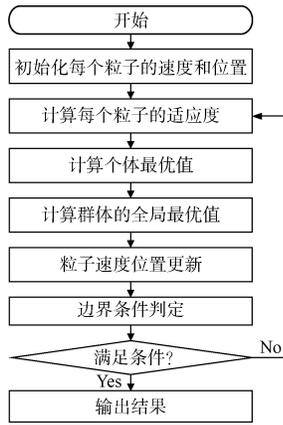


图8 粒子群算法流程图

Fig. 8 Particle swarm optimization algorithm flowchart

表1 粒子群算法主要参数

Table 1 Spectrometer and buoy measurement results comparison

每个粒子初始坐标	$x_i=(x_{i,1},x_{i,2},\dots,x_{i,d},\dots,x_{i,D})$
每个粒子飞行速度	$v_i=(v_{i,1},v_{i,2},\dots,v_{i,d},\dots,v_{i,D})$
第 <i>i</i> 个粒子的历史最优坐标	$P_i=(P_{i,1},P_{i,2},\dots,P_{i,d},\dots,P_{i,D})$
每个粒子经历的最优坐标	$P_g=(P_{g,1},P_{g,2},\dots,P_{g,d},\dots,P_{g,D})$

速度; x_{id}^k 为位置; k 为迭代次数; c_1 和 c_2 为加速因子, 指导粒子如何遵循 p_{best} 和 g_{best} , 通常情况下取 $c_1=c_2$; r_1 和 r_2 为基于 0 到 1 之间的随机数。参数 ω 表示惯性权重, 它控制原速度对新速度的影响。当 ω 较大时, 该算法具有强全局性搜索能力, 而较小的 ω 可以使算法具有较强的局部搜索能力。参数 ω 表达式为:

$$\omega = \omega_{max} - \frac{k(\omega_{max} - \omega_{min})}{iter_{max}} \quad (21)$$

式中, $iter_{max}$ 为最大迭代次数; ω_{max} 和 ω_{min} 为权重的初值和终值, 因此权重 ω 的变化方式为:

$$\omega = a\omega_d + b\omega_k \quad (22)$$

随之, 粒子的位置将不断地被更新进而不断接近全局最优解。

粒子的初始位置为查找表关于横滚/俯仰的二维索引, 当采用 n 个波束入射角, 查找表角度范围在 $\pm\theta$ 步进 $d\theta$ 时, 就会有 $2n$ 个维度确定一个粒子的位置, 每个维度索引范围在 1 到 $2\theta/d\theta + 1$ 之间, 初始随机生成 m 个粒子, 设定每个粒子随机初始位置 $P_m = [P_{1,1}, P_{1,2}, P_{2,1}, P_{2,2}, \dots, P_{n,1}, P_{n,2}]$ 和随机速度 $v_m = [v_{1,1}, v_{1,2}, v_{2,1}, v_{2,2}, \dots, v_{n,1}, v_{n,2}]$ 以及加速因子 a 大小, 每轮搜寻同时移动所有粒子一次, 并计算各个粒子对应的代价函数值, 接着沿着这次寻找到的最优值

的方向继续寻找下一轮的最优值, 通过更新个体最优位置和全局最优位置迭代获取代价函数最优的粒子位置, 最后验证代价函数最小时, 是否能够校正散射系数剖面存在的问题。

3 方法验证

3.1 引言

为了验证本文方法对星载相控阵海浪波谱仪天线增益校正的可行性, 决定通过机载平台进行飞行试验, 机载平台由于风速、人为等不可控因素, 在飞行过程中机载平台会产生比星载平台更大的姿态角, 导致方向图校正更为困难, 需要利用 2.2 节提到的校正方法和优化算法结合的方式完成校正。

3.2 机载飞行试验

2023年6月, 北京遥测技术研究所秦皇岛市渤海海域附近开展了相控阵海浪波谱仪机载飞行试验, 以相控圆锥扫描方式获取海面回波功率, 利用回波功率反演后向散射系数和海浪谱。本次飞行试验设计三个波束中心角度指向, 分别是 0° 、 10° 和 15° , 波束宽度 12° , 最大能覆盖 $0\sim 20^\circ$ 入射角, 波束方位角步进 3.75° , 每圈共 96 个波位。利用本次的飞行数据对算法进行验证, 通过本文算法校正积分因子, 获取校正后的散射系数与常规方法进行对比。

本次飞行试验导出数据后, 首先对回波进行匹配脉压获取不同入射角下的斜距; 接着根据惯导姿态完成波束几何校正, 获取相对准确的波束指向; 将校正后的回波进行非相参积累作为回波的接收功率; 校正方向图对接收功率的影响获取后向散射系数; 利用散射系数计算调制函数反演海浪谱。具体流程图如图 9 所示。

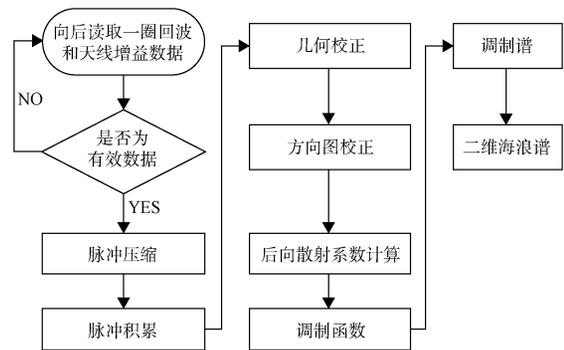


图9 机载数据处理流程

Fig.9 Airborne data processing workflow

3.3 结果分析

由于机载条件下姿态角变动较大 (本次试验最大可达 5°), 因此无法直接利用查找表进行迭代, 需要先校正姿态产生的波束指向偏差。建立查找表时认为暗室测量的天线俯仰角和横滚角的误差范围在 $\pm 0.2^\circ$ 之间, 步进为 0.01° , 因此对于 96 个方位每个方位都会生成 41×41 个积分增益曲线查找表, 利用粒子群算法搜索满足代价函数值最小的误指向角, 并与传统方法进行对比。首先需要获取该圈扫描的原始回波接收功率和对应的积分增益, 结果如图 10 所示, 15° 回波中出现了上文中提到的散射系数“凹现象”。

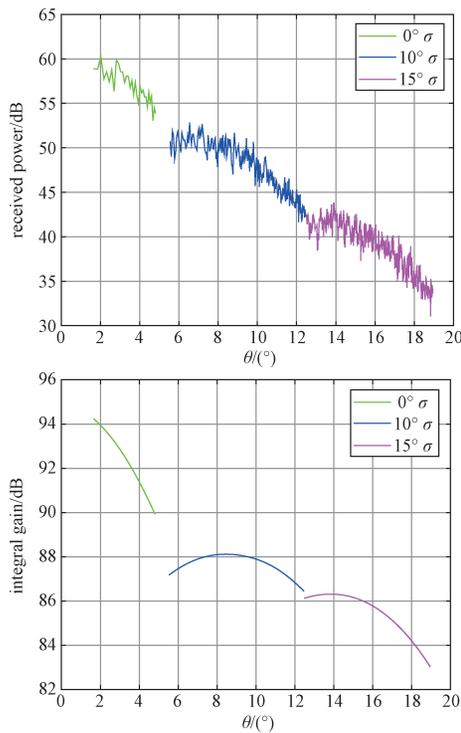


图 10 原始回波接收功和积分增益
Fig.10 Original echo received power and integral gain

图 10 表示回波功率和积分增益幅度随着入射角增大而下降, 图中的 3 种不同颜色代表 3 种不同的波束入射角 ($0^\circ/10^\circ/15^\circ$); 接着根据公式 6 计算后向散射系数, 并绘制方位角为 0° 时其随入射角变化关系, 如图 11 所示, 横坐标为三种波束指向下的波束入射角, 纵坐标为反演出的后向散射系数, 可以看到在 15° 入射角的波束中明显出现了上文中提到的“凹现象”。

对反演的后向散射系数按 2.3 节提到的方法校正, 由于 0° 回波指向天底点。不涉及旋转, 因此

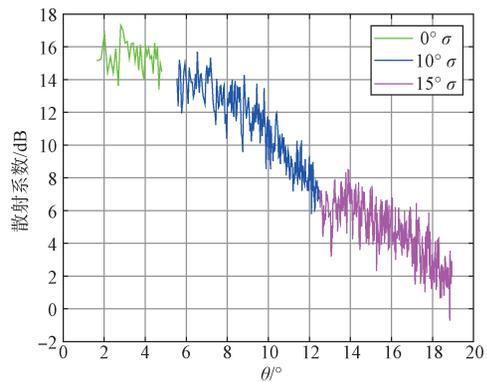


图 11 原始回波和未修正积分增益计算出的散射系数
Fig.11 Scattering coefficients calculated from original echo and unadjusted integral gain

无法获取其覆盖范围内的方位角信息, 只对其余两个人射波位 (10° 和 15°) 进行 $0 \sim 360^\circ$ 方位角的校正, 校正结果如图 12 所示。

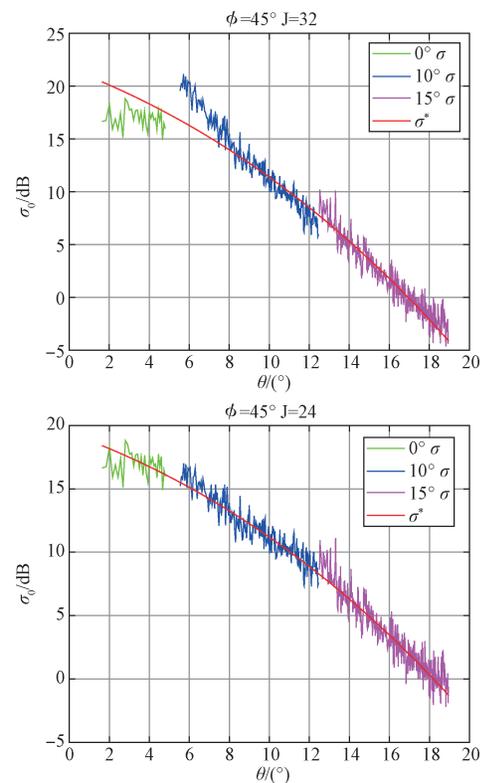


图 12 不同代价函数值对校正结果的影响
Fig.12 The impact of different cost function values on calibration results

图 12 表明, 每次迭代中不同的代价函数 J 的值对校正结果影响的不同, 当 J 值越小, 2 阶拟合结果越好, 最终得出多个方位角下最小代价函数校正出的散射系数结果前后对比。

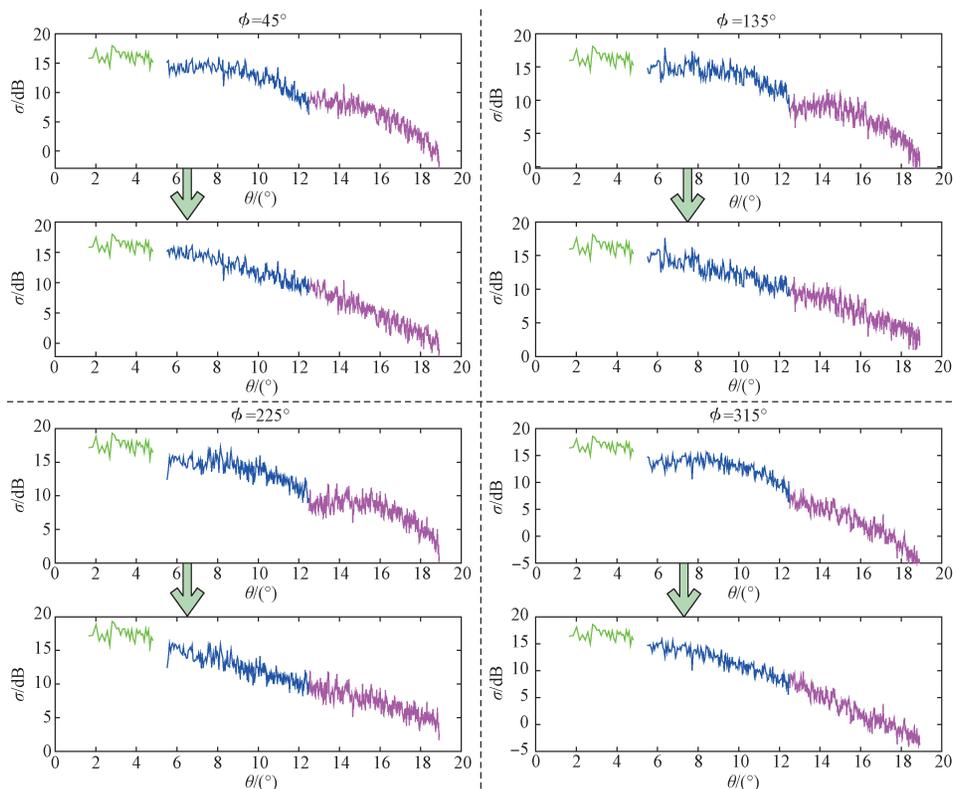


图13 不同方向上校正效果

Fig.13 Correction of upright effect in different orientations

对于0~360°方位角修正的天线积分增益效果如图14所示，横轴代表入射角，纵轴代表方位角，

积分增益修正的范围约在±1.5 dB之间。

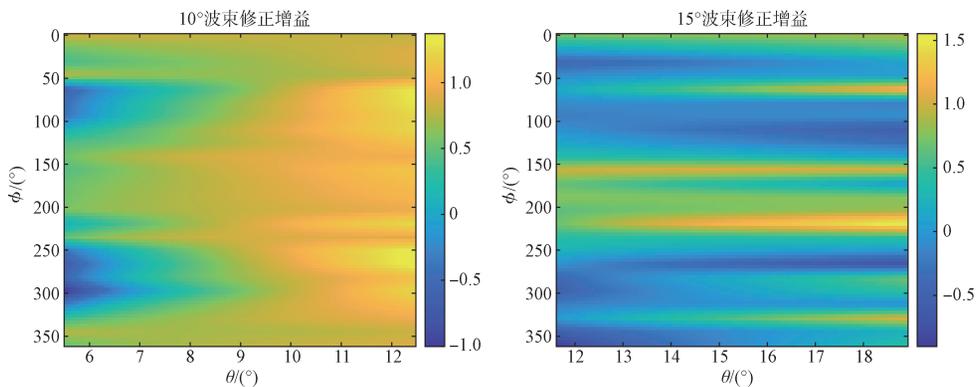


图14 不同波位天线增益修正情况

Fig.14 Antenna gain correction in different orientations

图15中，(a)图是直接反演出的归一化海浪斜率谱，峰值能量位置出现在230°、波数0.2 rad/m附近，(b)图是采用优化算法反演出的归一化海浪斜率谱。由于噪声的存在，波长大于500 m的信号太弱，实际处理时将谱值置0，通过对比可以看出优化后调制谱的噪声更小，同时波束分辨能力和波向分辨能力有较大的提升。

图16分别绘制了粒子群算法优化前和优化后的波向、波高结果，并与浮标的波向、波高结果对比，蓝色和棕色实线分别为浮标探测的有效波高和波向结果，可以看出校正后的结果更接近浮标，误差<10%。使用修正后的结果绘制二维海浪谱，对长时间反演的二维海浪谱积累后取平均，与波浪骑士浮标同步观测结果对比见表2。

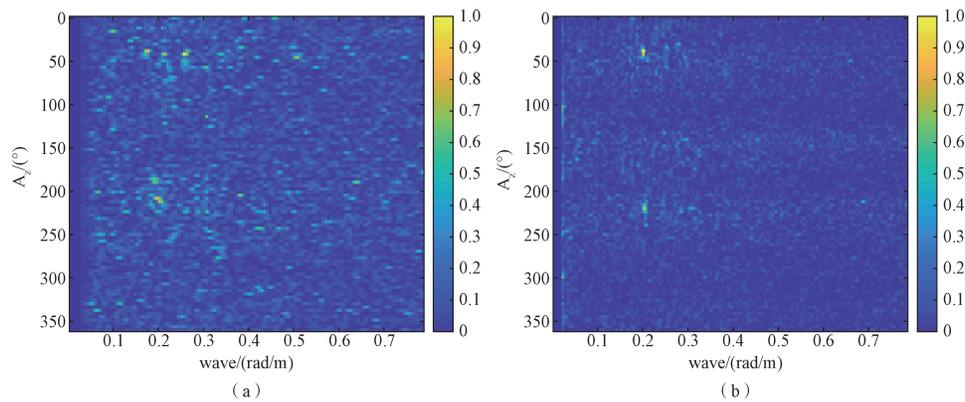


图 15 修正前后海浪斜率谱对比

Fig.15 Comparison of wave slope spectrum before and after correction

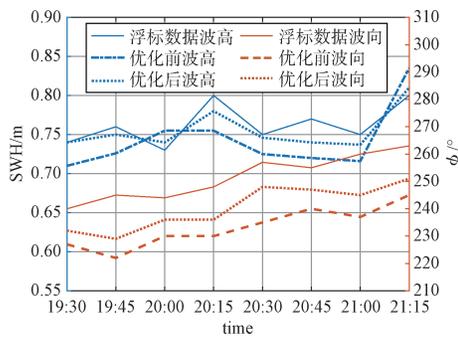


图 16 修正前后有效波高、波向与浮标结果对比

Fig.16 Comparison of modulation spectra before and after correction

表 2 相控阵海浪波谱仪与浮标测量结果对比

Table 2 Phased Array spectrometer and buoy measurement results comparison

序号	时间	相控阵海浪波谱仪			浮标		
		波长/m	波向/ $^{\circ}$	有效波高/m	波长/m	波向/ $^{\circ}$	有效波高/m
1	19:30	29.84	232/52	0.744	29.91	240	0.74
2	19:45	29.12	229/49	0.751	28.76	245	0.76
3	20:00	29.06	236/56	0.742	30.21	244	0.73
4	21:15	29.77	237/57	0.780	31.52	248	0.80
5	20:30	30.02	248/68	0.746	32.13	257	0.75
6	20:45	30.54	247/67	0.740	31.85	255	0.77
7	21:00	30.92	245/65	0.737	32.78	260	0.75
8	21:15	30.88	251/71	0.812	33.50	263	0.80

4 结束语

针对暗室天线波束指向测量精度不足造成的天线积分增益误差, 校正散射系数随入射角变化中的“凹现象”, 本文通过建立天线误指向查找表, 设计代价函数并利用粒子群算法完成迭代,

从海浪参数反演结果可以看出, 本方法能够有效迭代使后向散射系数趋势回归理论的二次多项式趋势, 最终回波数据有效率提升 12%。本文中使用的有效优化后向机载相控阵波谱仪散射曲线随入射角变化趋势, 使反演海浪参数精度明显提高。同时, 由于星载平台的姿态角度变化远远小于机载平台, 在校正星载平台下的海面后向散射系数时, 无需通过传统姿态校正找到波束指向, 可以直接使用查找表迭代获取趋势正常的散射系数, 为提高海浪参数反演精度提供算法支撑, 同时为业务化的海浪谱生产提供了技术支撑。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] KUDRYAVTSEV, VLADIMIR. A semiempirical model of the normalized radar cross section of the sea surface, 2. Radar modulation transfer function : Fluxes, surfaces waves, remote sensing, and ocean circulation in the North Mediterranean Sea: Results from the FETCH experiment[J]. Journal of Geophysical Research, 2003.
- [5] MOUCHE A A , HAUSER D , DALOZE J F, et al. Dual-polarization measurements at C-band over the ocean: Re-

- sults from airborne radar observations and comparison with envisat asar data[J]. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIE-NCE AND REMOTE SENSING, 2005, 43(4): 753-769.
- [6] CAUDAL G C, GÉRARD, HAUSER D, et al. KuROS: A new airborne Ku-band doppler radar for observation of surfaces[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014,31(10).
- [7] Hauser D, Soussi, 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 & Oceanic Technology, 2001.
- [8] 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 Tec-hnology, 2016.
- [9] BARRICK.D.E. Rough surface scattering based on specular point theory[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1968, 16(4): 449-454. DOI: 10.1109/TAP.1968.1139220.
- [10] 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.
- [11] 尹巧华. 基于机载波谱仪数据的海浪斜率与海浪方向谱反演研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2016.
- [12] 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.
- HAN Qianqian, ZHANG Zhenhua, MENG junmin, et al. Research on processing method of the airborne ocean-wave spectrometer data[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017(2): 116-121.
- [13] 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, 2020,99:1-22. DOI:10.1109/TGRS.2020.2994372.
- [14] 陈彬, 骆鲁秦, 王岩. 基于粒子群聚类算法的雷达信号分选[J]. 航天电子对抗, 2009, 25(5): 25-28.
- CHEN Bin, LUO Luqin, WANG Yan. Radar signal sorting based on particle swarm optimization clustering Algorithm[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2009, 25(5): 25-28.

[作者简介]

- 谢天壹 1997年生, 硕士研究生。
韩倩倩 1988年生, 硕士, 工程师。
苗洪利 1964年生, 教授, 硕士生导师。
曹 蕾 1989年生, 博士, 工程师。
江柏森 1982年生, 硕士, 研究员。
张振华 1969年生, 博士, 研究员。

(本文编辑: 潘三英)