

机载杂波测量雷达的有源绝对校准技术研究

康士峰^{1,2}, 葛德彪¹, 张忠治², 罗贤云²

(1. 西安电子科技大学物理系, 西安 710071; 2. 中国电波传播研究所青岛分所, 青岛 266071)

摘 要: 雷达系统的精确校准是保证地海杂波测量数据可靠性的关键问题. 本文利用地面有源雷达校准器 (ARC) 对 L 波段 HH 极化机载杂波测量雷达进行绝对校准, 通过 ARC 设计、目标提取以及坐标系变换技术, 充分考虑了校准场地背景杂波、载机姿态和 GPS 误差等因素对雷达系统常数、时延和天线方向图的影响. 分析结果证明了这一技术的有效性.

关键词: 杂波; 雷达; 校准; 机载; 测量

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 12-0025-04

Study on Active Absolute Calibration Technique of Airborne Clutter Measurement Radar

KANG Shi feng^{1,2}, GE De biao¹, ZHANG Zhong zhi², LUO Xi ar yun²

(1. Physics Department of Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Qingdao Branch, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266071, China)

Abstract: Exact calibration of radar systems is an important problem to ensure the data reliability of the terrain and sea clutter measurement. This technique calibrates the L-band HH polarized airborne clutter measurement radar absolutely with active radar calibration (ARC) on the ground. The effects of background clutter, airplane postures and GPS errors on system constant, time delay and antenna pattern are considered carefully by means of design of RCS, signal extraction of ARC and a set of coordinate transforms. The validity of this method is proved by the analysis results.

Key words: clutter; radar; calibration; airborne; measurement

1 引言

地海杂波研究的主要目的是要获得雷达目标所处地球表面环境中各种地形地物和海面特征所对应散射回波的特性 (如散射系数与地形、频段、极化和入射角等的关系), 关心回波幅度的绝对大小, 因此, 雷达系统的绝对校准成为杂波测量中的一个关键问题^[1-3]. 在进行杂波测试之前, 首先要对雷达元器件和分系统等进行仔细测量, 另一方面还需要对雷达系统总体性能参数进行标准 RCS 目标的远场测量, 后者一般在现场进行, 以便估计并消除安装和环境变化等因素对雷达系统的影响. 在国内外所开展的地基散射测量以及航空、航天遥感理论研究和技术应用中, 为了得到地面散射特性、进行不同类型地面或探测系统测量数据的对比分析、分类和识别, 一般都设计了雷达系统的绝对校准方案. 但是, 对于航空和航天观测, 由于空中平台的动态性、理想校准场地不易选择、校准目标设计较为复杂等因素, 系统校准要保证较高精度十分困难. 校准目标可以采用已知雷达散射截面 (RCS) 的无源角反射器、有源校准器和均匀扩展地物 (如热带雨林), 但实际上校准

场地背景杂波干扰严重, 或者很难找到大面积的理想均匀地物. 因此目前较好的选择是采用有源雷达校准器 (ARC), 它安装方便、体积小且 RCS 可以设计的较大, 能提供校准所需的足够信杂比以获得较高的校准精度^[4,5]. 本文针对机载雷达杂波测量, 地面采用多个具有数据记录功能的有源雷达校准器进行雷达系统常数、时延和天线方向性的校准, 由于校准过程中涉及的因素十分复杂, 载机姿态和环境干扰等很多环节难以人为控制, 因此为了获得准确的系统参量, 对有影响的主要因素如坐标系变换、角度校正、信号提取等进行了仔细分析, 对其所产生的误差进行了修正或作出合理的估计, 保证了较高要求的系统校准和杂波数据测量精度. 由于平台运动的相似性, 本校准技术也可提供其它机载雷达测量系统和星载、航天平台探测系统校准参考.

2 机载杂波测量雷达系统和有源雷达校准器

机载杂波测量雷达的主要设计参数如表 1 所示.

雷达天线在地面测得主轴附近较小范围 (0~30°) 的俯仰

表 1 雷达系统参数

频率	1.35GHz	天线	半波偶极子阵
极化	HH	增益	19.45dB
峰值功率	3.3KW	方位 3dB	5.14度
PRF	0.5, 2, 1KHz	VSWR	≤1.25
脉冲宽度	40μs, 4μs, 1μs	天馈损耗	5dB
噪声系数	≤2.5dB	采样频率	4, 2, 1MHz
灵敏度	-109dB	数据形式	I, Q 双通道
通道延时	40μs, 1μs	工作方式	正侧视

方向图, 不能满足距离方向随入射角变化对应的大范围覆盖的杂波测量要求, 因此, 天线方向性以及系统延时和衰减常数成为雷达系统需要校准的主要参数。

有源雷达校准器(ARC)的雷达散射截面(RCS)或 σ_c 由下式给出:

$$\sigma_c = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{rc}(\theta, \varphi) G_{tc}(\theta, \varphi) G_a \quad (1)$$

式中: $G_{rc}(\theta, \varphi)$, $G_{tc}(\theta, \varphi)$, G_a 分别为 ARC 的接收天线、发射天线和电路系统增益。测量精度与雷达分辨单元内 σ_c 和校准场地背景杂波散射截面 σ_b 的相对大小有直接关系, 取二者之比大于 20dB 可使误差限制在约 ±1dB 以内。设 $S_b^2 = \sigma_b / \sigma_c$, 则误差极限为^[1]:

$$\sigma_c(\text{dB}) = 10\lg(1 + S_b^2 \pm 2S_b) \quad (2)$$

脉冲雷达背景杂波的雷达散射截面为:

$$\sigma_b = R\beta_{3B} \times \frac{c\tau}{2s \sin\theta} \times \sigma^0 \quad (3)$$

式中 R 为雷达至分辨单元的距离, β_{3B} 为雷达天线方位 3dB 宽度, τ 为发射脉冲宽度, θ 为入射角, c 为光速。若以脉宽 1μs、距离 7km、入射角 75° 为代表, 取背景散射系数 σ^0 为 -15dB, 可得 $\sigma_b = 35\text{dBm}^2$ 。按以上要求, 则 $\sigma_c \geq 55\text{dBm}^2$, 本文采用的七台 ARC 散射截面见下表。校准时的实际 RCS 值需要根据对准角度确定, 若 RCS 值下降较大将会减小信杂比, 影响测量精度。

表 2 ARC 的 RCS 最大值 (dBm²)

ARC	1	2	3	4	5	6	7
RCS	56.5	59.8	59.1	58.5	58.8	59.4	60.9

3 机载杂波测量雷达的绝对校准

图 1 所示, 由 ARC 附近地物状况、雷达方位分辨率和所需校准的天线俯仰角度范围适当选择校准时多个航次的飞行距离、高度和航向。七个 ARC 在雷达距离方向一字排开, 方位指向与飞机航向垂直并根据相对航线的几何位置上仰不同的角度。记录数据主要包括两部分: 机上雷达校准数据(ARC 回波 I、Q 电压值)和载机 GPS 数据(经纬度、高度)、姿态数据(航向、俯仰和航速); 地面 ARC 校准数据(雷达信号电压值)和 GPS 位置数据。

3.1 机上校准数据的分析处理

雷达方程表达式为^[1]:

$$P_r = \frac{P_t G_0^2 G_f^2(\theta, \varphi) \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L} \quad (4)$$

式中: P_r 、 P_t 分别为雷达接收和发射功率, G_0 为雷达天线增益, $G_f(\theta, \varphi)$ 为方向性因子, λ 为发射波长, σ 为照射目标散射截面, R 为雷达天线至目标间的距离, L 为雷达系统常数。

(1) 系统附加延时。雷达与目标间的距离和距离门 N 、采样频率 f_r 、采样延时 τ_0 、附加延时 τ_a 的关系为:

$$R = \frac{c}{2} \times (N/f_r + \tau_0 + \tau_a) \quad (5)$$

根据 ARC 所在位置的 GPS 数据以及和校准数据同步记录的雷达采集参数、载机 GPS 数据可确定式中的附加延时参数, τ_a 校准结果为: 均值 - 1.96μs, 标准差 0.39μs。

(2) 雷达天线方向性和系统常数。将式(4)中需要校准的其它量提取出来:

$$G_f^2(\theta, \varphi)/L = \frac{P_r(4\pi)^3 R^4}{P_t G_0^2 \lambda^2 \sigma_c(\theta_c, \varphi_c)} \quad (6)$$

式中的角度应分别在雷达天线坐标系和 ARC 天线坐标系中选取。如下图, 设雷达天线坐标系和载机坐标系重合; ARC 所在位置以排列方向为参考的地面坐标系为 $X_t Y_t Z_t$, 其天线坐标系为 $X_c Y_c Z_c$, 载机所在位置以正北为参考的地理坐标系为 $X_n Y_n Z_n$, 理想航线坐标系为 $X_f Y_f Z_f$ 、偏航坐标系为 $X_d Y_d Z_d$ 、横滚坐标系为 $X_g Y_g Z_g$ 。

若 ARC 天线主瓣上仰 δ , 理想航线与正北之间的夹角为 ζ , 真航向与正北之间的夹角为 α (顺时针方向), 飞机俯仰角为 β (上仰为正), 横滚角为 γ 。再设回波出现最大值时 ARC 与载机之间的连线在理想航线坐标系中的位置为 (θ_m, φ_m) , 为了找出其在雷达真实天线坐标系中的位置 (θ, φ) 以及在 ARC 天线坐标中的位置 (θ_c, φ_c) , 需要作以下坐标变换。

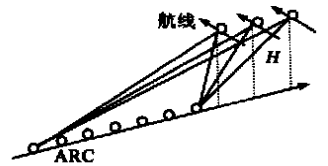


图 1 校准时 ARC 与航线的几何关系

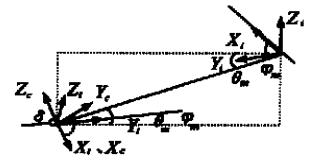


图 2 地面和空中坐标几何关系

(a) 地面坐标系变换:

$$X_t Y_t Z_t \xrightarrow{\delta} X_c Y_c Z_c$$

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & -\sin \delta \\ 0 & \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \sin \theta_c = \sin \theta_m \cos \delta - \cos \theta_m \sin \varphi_m \sin \delta \\ \text{tg } \varphi_c = \frac{\cos \theta_m \sin \varphi_m \cos \delta + \sin \theta_m \sin \delta}{\cos \theta_m \cos \varphi_m} \end{cases} \quad (8)$$

以相对主轴角度 $(\theta_c, 90^\circ - \varphi_c)$ 来确定 ARC 的实际散射截面。

(b) 载机坐标系变换:

$$X_i Y_i Z_i \xrightarrow{\zeta} X_n Y_n Z_n \xrightarrow{\alpha} X_f Y_f Z_f \xrightarrow{\beta} X_d Y_d Z_d \xrightarrow{\gamma} X_g Y_g Z_g$$

总的变换矩阵为(其中 $x = \zeta + \alpha$):

$$T =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \sin \alpha \cos \gamma - \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \sin \gamma - \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma \\ -\sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma \\ \sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix}$$

$$\text{可以得出: } \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi \\ \cos \theta \sin \varphi \\ -\sin \theta \end{bmatrix} = \mathbf{T}' \begin{bmatrix} \cos \theta_m \cos \varphi_m \\ \cos \theta_m \sin \varphi_m \\ -\sin \theta_m \end{bmatrix} \quad (9)$$

(θ, φ) 即为校正飞机姿态误差后对应的 ARC 在雷达天线方向图中的实际位置。

(3) 极化失配损失。载机发生姿态误差时会引起极化失配损失, 导致天线增益 G_0 下降:

$$G' = G_0 + 20 \lg[\cos(\zeta + \alpha) \cos \beta] \quad (10)$$

由上式看出, 极化矢量的变化与航向和俯仰有关而与侧滚无关。一般飞行姿态引起的极化增益下降值(双程)小于 0.04dB。

(4) 方位方向性。雷达接收的方位回波包络在经过 ARC 时可以给出雷达天线的方位方向图, 该包络实际已受到 ARC 天线方向性的调制或加权变窄。由式(1)、(4):

$$P_r = \frac{P_r G_0^2 G_f^2(\theta, \varphi) \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{rc}(\theta_c, \varphi_c) G_{tc}(\theta_c, \varphi_c) G_a \quad (11)$$

若以包络最大值为参考, 则方位角与脉冲数 n 的关系为:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{nV}{R \times PRF}\right) \quad (12)$$

其中: V 为载机速度, R 为斜距, PRF 为脉冲重复频率。方位 3dB 宽度校准结果为: 均值 5.02 度, 标准差 0.58 度; 而设计值为 5.14 度。

(5) ARC 最大回波信号的提取。当式(11)中方向性因子乘积 $g = G_f^2(\theta, \varphi) G_{rc}(\theta_c, \varphi_c) G_{tc}(\theta_c, \varphi_c)$ 最大时对应目标回波最大, 通过前面的坐标系变换已得到了相应的角度值和 RCS 值。另一个关键问题是提取此时的 ARC 回波电压, 进一步通过校机曲线换算为接收功率进入雷达方程。校准回波信号 $S(t)$ 主要包含以下三部分:

$$S(t) = T(t) + C(t) + n(t) \quad (13)$$

式中 $T(t)$ 代表 ARC 目标信号, $C(t)$ 代表背景地杂波干扰, $n(t)$ 代表噪声干扰。另外还可能有环境有源干扰和天空背景干扰、多径效应影响等。虽然在选取校准场地和设计 ARC 时已有所考虑, 但实际上这些干扰不能完全避免。为了减小干扰影响, 经比较, 采用以下信号处理方法提取 ARC 回波最大值(图 3): (A) 选取一定空间采样长度的回波 I, Q 数据进行 FFT 并取其幅度; (B) 对频域数据进行滤波提取主瓣幅度最大值。这种方法在频域提高了地面单元的方位分辨率, 分离了旁瓣杂波, 进一步提取出包络变化和对应的电压最大值。对校准数据 $G_f^2(\theta, \varphi)/L$ 随俯角的变化进行拟合, 并以实测天线方向图 2° 对应的 3.02dB 为参考获得系统常数 $L = 8.86$ dB 和 $16 \sim 70$ 度范围内的俯仰方向性因子曲线, 其平均误差为 -0.19 dB, 均方差 2.25dB(图 4 中实线, * 为 ARC 校准数据点)。

3.2 地面校准数据的分析处理

ARC 能够将接收功率转换为电压存入电脑供监测和地面处理, 其接收的雷达功率为:

$$P_{rc} = \frac{P_r G_0 G_f(\theta, \varphi) G_{rc}(\theta_c, \varphi_c) \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (14)$$

通过分析该数据同样获得了雷达系统的有关信息, 如图 4 中虚线所示, 所得到的雷达天线俯仰方向图与机上数据处理结果吻合较好。

4 校准误差分析

校准误差主要来源于以下几项:

(1) ARC 的 RCS 误差: 对 ARC 的测试表明, 其稳定性较好且方向图较宽, 指向误差加上由于几何关系误差导致的 RCS 计算误差, 精度约为 0.8dB。

(2) 环境干扰: 主要为地杂波干扰, 在 ARC 的 RCS 设计及校准数据选择时已确保信杂比大于 20dB, 保证了被测散射截面误差在 ± 1 dB 以内。

(3) GPS 误差: 校准时采用的距离和角度均以 GPS 数据为基础。

(a) 距离影响。距离 R 的计算方法为:

$$R = \sqrt{(H-h)^2 + (\Delta N \cdot R_e)^2 + (\Delta E \cdot R_e \cos n)^2} \quad (15)$$

其中 H 和 h 分别为载机和 ARC 所在位置的海拔高度, ΔN 和 ΔE 分别为对应两点之间的纬度差和经度差, R_e 为地球半径 6378km, n 为校准区域所处的纬度。距离误差 ΔR 分别与高度误差 ΔH 和经纬度误差 $\Delta e, \Delta n$ 的关系为:

$$\begin{aligned} \Delta R_H &= \frac{(H-h)}{R} \Delta H, \Delta R_N = \frac{\Delta N \cdot R_e^2}{R} \Delta n, \\ \Delta R_E &= \frac{\Delta E \cdot (R_e \cos n)^2}{R} \Delta e \end{aligned} \quad (16)$$

如按高度误差为 50 米, 经纬度误差为 3 秒, 则在测试区域(纬度 2 分、经度 2~5 分变化)内三项引起的距离总误差不超过 130 米。由距离误差引起的散射系数误差表示为:

$$\Delta \sigma = 40[\lg(R + \Delta R) - \lg R], R = (H-h)/\sin \theta \quad (17)$$

经计算, 在 $10 \sim 70$ 度俯角变化范围内的散射系数误差小于 0.7 分贝。

(b) 角度影响。飞机姿态的 GPS 记录误差造成雷达天线俯角的计算误差, 若拟合出的天线方向图近似于实际方向图, 姿态角度参数的精度为 0.1 度, 则对校准值影响不到 0.15dB。

(4) 天线定位误差: 包括 ARC 天线机械定位偏差和机上天线的安装误差。由于 ARC 方向图较宽, 前者一般可以忽略。后者可以通过频域数据和校准修正后的方位数据分析获得, 它主要影响主瓣多普勒频移中心的位置和相对 ARC 最大值的方位。

(5) 几何模型误差: 该项误差表现在对距离和角度的计算上, 由于校准时的飞机与 ARC 最远相距约 10 公里, 平面地球模型影响不大。

基于以上分析, 雷达系统的校准精度在 2.5dB 以内。

5 讨论

地海杂波测量的难点之一是雷达系统的绝对校准, 特别是对于机载杂波测量雷达, 平台的复杂运动和校准场地背景干扰、校准目标 RCS 的设计等导致潜在的多项误差。在以上

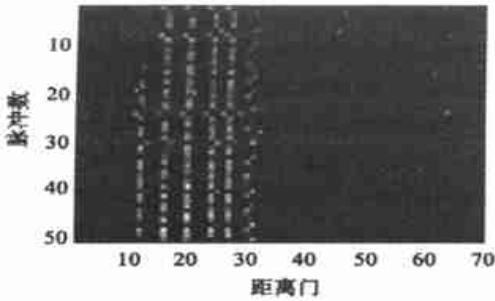
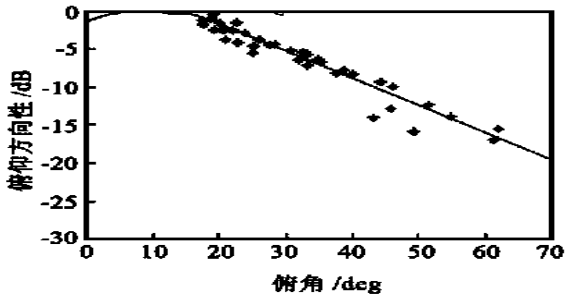


图3 ARC 回波图像

图4 天线 $G_T(\theta, \varphi)$ 随俯角变化曲线

校准方法中, 校准场地选择背景杂波干扰较小的平坦农田和机场, 校准目标采用稳定性好、RCS 较大且易于调整的有源校准器, 保证了一定精度所需的信杂比和相对载机易于设置的几何关系; 同时, 利用基于 GPS 数据和载机姿态数据的坐标变换技术和目标提取技术, 将最大 ARC 信号对应的视在角度与在雷达天线坐标系中的真实角度联系起来, 得到了较准确的天线方向图。误差分析表明, 散射系数测量精度可以优于 2.5 dB。通过校准, 对有关雷达参数进行了验证, 获得了雷达系统的时延常数、系统损耗常数和天线方向图, 从原来测量的俯角 $0 \sim 30^\circ$ 有限方向图范围扩展到了约 $0 \sim 70^\circ$, 可以使杂波数据获得更充分的有效利用。根据本文校准结果对多种典型地形地物的机载雷达杂波数据分析将另文给出。

致谢: 作者对所在杂波项目组、14 所杂波雷达研制和试验人员的共同努力和协作表示感谢!

参考文献:

- [1] F. T. Ulaby, R. K. Moore, A. K. Fung, Microwave Remote Sensing Vol. II: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory, 1982.
- [2] M. W. Long, Radar Reflectivity of Land and Sea [M]. Artech House, Inc., 1983.
- [3] D. K. Barton, et c., Radar Evaluation Handbook [M]. Artech House, Inc., 1991.
- [4] A. D. Woode, Y. Desnos and H. Jackson, The development and first results from the ESTEC ERS 1 active radar calibration unit [J]. IEEE Trans. on Geo. and Remote Sensing, 1992, 30(6): 1122- 1129.
- [5] A. L. Gray et c., SAR calibration using reference reflectors [J]. IEEE Trans. on Geo. and Remote Sensing, May, 1990, 28: 374- 383.

作者简介:



康士峰 高级工程师, 中国电子学会高级会员。1987 年毕业于成都电讯工程学院电磁场工程系, 1993 年在中国电波传播研究所获工学硕士学位, 1997 年开始在西安电子科技大学攻读博士学位。现主要从事电磁散射理论、杂波测试和模拟工作。

张忠治 研究员, 国防科工委目标与环境特性专业组成员。主要从事地海面散射理论、微波遥感、信号处理及其在雷达系统中的应用研究。

葛德彪 西安电子科技大学教授、博士生导师, 中国电子学会会员。1961 年毕业于武汉大学物理系。主要从事逆问题与电磁成像、电磁散射和数值方法研究。

第七届中国密码学学术会议征文通知

第七届中国密码学学术会议拟定于 2002 年 5 月在山东省(具体地点另定)举行。

征文范围: 会议重点征集密码学(数学的和非数学的)、信息网络安全理论和关键技术方面的研究论文。具体包括: 序列密码、分组密码、公钥密码、Hash 函数和秘密共享、数字签名和身份识别、密钥管理和密钥恢复、密码协议、CA 系统、可信性和不可否认性、公平性与可证实性、信息攻防、信息隐匿、电子商务安全等方面的理论和技术。

征文要求: 论文必须为未公开发表并且未向学术刊物和其它学术会议投稿的最新研究成果, 文稿使用中文或英文书写, 字数一般不超过 6000。将论文全文(注明作者的联系电话和 E-Mail 地址)一式三份挂号寄至:

西安电子科技大学 106 信箱 杨波 收
邮政编码: 710071 电话: 029 8203028

E-Mail: yangbo@mail.xidian.edu.cn

征文截止日期: 2001 年 8 月 31 日