

L 波段 HH 极化机载雷达杂波特性分析

康士峰¹, 张忠治¹, 葛德彪²

(1. 中国电波传播研究所青岛分所, 山东青岛 266071; 2. 西安电子科技大学理学院, 陕西西安 710071)

摘 要: 本文利用经地面有源绝对校准的机载杂波雷达, 对平原、丘陵和山区等典型地形地物进行了 L 波段 HH 极化雷达杂波特性测量. 修正了载机姿态变化对杂波测量的影响, 比较了常数 γ 模型、 n 次模型和指数模型以及四种概率分布对杂波数据的分析结果, 表明 n 次幂 γ 模型和 Weibull 分布及 K 分布与测量数据较为一致, 并给出了相应的模型统计参数.

关键词: 机载雷达; 模型; 概率分布; 地形; 杂波

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12-1608-03

Analysis of Airborne Radar Clutter at L-Band HH Polarization

KANG Shi-feng¹, ZHANG Zhong-zhi¹, GE De-biao²

(1. Qingdao Branch, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao, Shandong 266071, China;

2. School of Sciences, Xidian University, Xi'an, Shanxi 710071, China)

Abstract: Based on the active absolute calibration of airborne radar, clutter characteristics of typical terrain (plain, hill, mountain and compound terrain) are measured at L-band HH polarization. Effects of the airplane postures on antenna pattern are modified. Analysis results of constant γ models, exponent model and four probability distributions are compared with data. It shows that γ model with index n and Weibull distribution, K distribution agree with the measured data and their statistical fitting parameters are also given.

Key words: airborne radar; model; probability distribution; terrain; clutter

1 引言

机载和星载下视雷达通常需要在较强的地海杂波而干扰环境中进行目标的检测、跟踪等工作, 相对地面雷达而言, 下视雷达如预警雷达的杂波动态范围大、多普勒频谱宽, 目标信号往往淹没在时、空、频域的杂波之中, 如何根据电磁散射环境的变化自适应地进行杂波干扰的有效抑制是机载雷达信号处理研究中的重要课题^[1~3]. 目前, 机载雷达的空时二维自适应信号处理、各种均匀和非均匀杂波环境中的 CFAR 处理等需要重点解决的问题是了解各种雷达地海面环境中包括时间、空间和频域在内的后向电磁散射特性, 以及雷达系统、平台设计误差和运动等问题对杂波变化的影响, 进一步采取改善或补偿措施. 通过雷达系统和目标环境仿真的方法可以获得杂波数据, 但因为模型的简化和缺乏地海面真实环境数据, 有一定的局限性^[4]; 另一方面, 基于地面和空中平台开展真实典型环境的地海杂波特性测量, 建立数据库, 虽然投入大、代价高, 但数据真实可靠, 具有较大的应用价值, 因此数据更为宝贵^[3]. 在前期工作中, 我们对机载杂波雷达系统的有源绝对校准方法进行了研究^[5], 本文在此基础上, 通过分析杂波测量方法、载机姿态修正和数据处理方法, 进一步给出四种典型陆地环境的杂波统计特性和相应模型参数.

2 机载杂波雷达系统与测量

试验时间为 1998 年 12 月, 载机为运七. 机载杂波雷达主要由计算机控制与采集系统、发射机和接收机系统、天馈系统、电源等部分组成, 性能参数如下^[3]: 波段: L-band; 重复频率: 0.5, 1, 2, 4 - 32kHz; 极化: HH; 采样率: 1, 2, 4MHz, 12 位, 20M 缓存; 工作方式: 正侧视; 灵敏度: -105dBm; 峰值功率: 3.3kW; 系统损耗: 8dB; 噪声系数: 小于 2.5dB; 天线形式: 水平偶极子阵; 通道: I, Q 两路; 增益: 19.45dB; 脉宽: 40 μ s 压缩, 4 μ s, 1 μ s; 波瓣宽度: 4.98 度(方位), 45.5 度(俯仰).

地面采用有源校准器对飞行状态的雷达系统进行了绝对校准, 经姿态分析和误差修正, 测量精度优于 3dB. 选择测量的陆地杂波对应两个航线三个航次, 由载机 GPS 数据并对照地面相应 1:5 万地形图分析, 地形地物主要特征有: (1) 平原, 平坦地形, 以麦田和村庄、乡镇、稀疏树木为主; (2) 丘陵, 以很少植被的黄土高原为特征, 有规则大尺度起伏; (3) 山区, 植被覆盖的秦岭地区, 起伏大但不均匀, 与相对山脉走向关系较大; (4) 混合地形, 含黄土高原、乡村、城市郊区的稀疏建筑物.

3 雷达杂波数据处理与统计特性分析

如图 1 所示, 地杂波所满足的正侧视机载雷达方程为^[1]:

$$P_r = \frac{P_t G_0^2 G_r^2(\theta, \varphi) \lambda^2 \sigma^0}{(4\pi)^3 R^4 L} (\beta_h R) \left(\frac{c\tau_p}{2\sin\theta} \right) \quad (1)$$

式中 P_t 、 P_r 是雷达的发射功率和接收功率; G_0 、 G_r 分别为天线的增益和方向性因子; R 为雷达与分辨单元之间的距离; L 为系统损耗; λ 为雷达波长; σ^0 为散射系数; θ 为雷达入射角; φ 为天线方位角; β_h 为天线方位 3dB 宽度; c 为光速; τ_p 为脉冲宽度。通过系统绝对校准,由式(1)求得散射系数 σ^0 [5]。

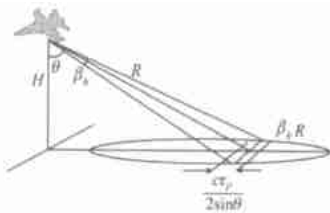


图1 侧视机载雷达杂波测量

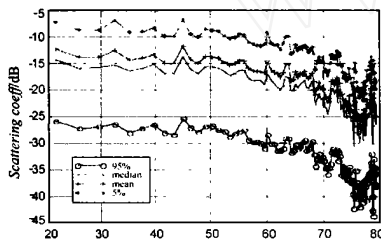
3.1 天线方向性修正

在飞行过程中载机姿态变化影响雷达天线方向图与照射地面的几何关系。因杂波测量不对航向作特别要求,航向变化只是使所测量的地面单元不同,它对杂波的统计特性不产生影响。而俯仰和横滚将影响测量单元在天线主瓣中的位置,需进行修正。

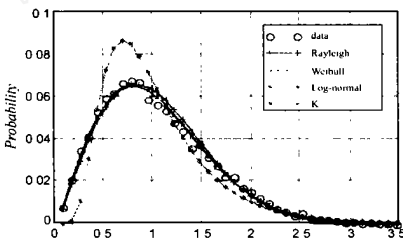
设飞机海拔高度为 H ,数据组对应的地面平均海拔高度为 h ,距离门对应斜距为 R ,则地面俯角为:

$$\theta = \sin^{-1}[(H-h)/R] \quad (2)$$

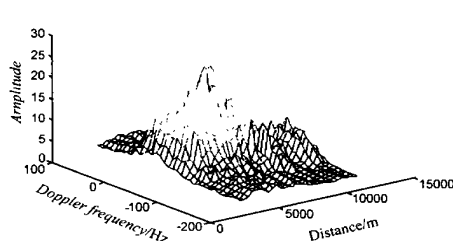
若天线主瓣偏离正侧视,相对机头方向方位角为 ϕ ,载机俯仰角为 β ,横滚角为 γ ,则坐标系转换矩阵为:



(a) 散射系数的变化



(b) 杂波幅度概率分布



(c) 距离-多普勒杂波谱

图2 杂波数据处理结果

表 1 给出由多组数据统计得到的地形散射系数的三种模拟拟合参数均值及标准差,每组数据代表约 2000 米的距离采样。大多数雷达如预警雷达的 CFAR 处理特别关心小概率杂波变化,因此表中也列出了 5% 超过概率对应的 γ 值。

从处理结果来看,数据呈现如下特点:

(1) 四种地形特征虽然区别较大,但一次模型 γ 值十分接近,在 -11.8~13dB 之间。

(2) 平坦地形的散射系数随入射角有明显的变化趋势且

$$T = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

修正后地面杂波分辨单元在天线波束中相对主轴的俯角为:

$$\theta_m = \sin^{-1}(\cos\theta\cos\phi\sin\beta\cos\gamma + \cos\theta\sin\gamma\sin\phi + \sin\theta\cos\beta\cos\gamma) \quad (4)$$

3.2 杂波数据处理和特性分析

对原始数据首先去掉直流偏置分量,经 FFT 在 Doppler 频域滤波,选出主瓣分量再经逆 FFT 到时-空域,所获数据进行对应地形地物特征和雷达参数、载机参数下的杂波特性分析,包括幅度概率密度分布、累积分布 (Rayleigh 分布、Log-normal 分布、Weibull 分布和 K 分布) 比较及分布参数拟合,给出距离-多普勒杂波图,散射系数的均值、中值、5% 和 95% 分位值,并对散射系数经验模型进行比较和评价。

常数 γ 模型为: $\sigma^0 = \gamma \cos\theta$ (5)

式中 θ 为入射角。为了使模型具有更大的适应性,又提出以下幂次模型:

$$\sigma^0 = \gamma \cos^n\theta \quad (6)$$

散射系数指数模型以堪萨斯大学广泛测量为基础,也是实验基础较好的一个,形式为:

$$\sigma^0 = \gamma e^{-\theta/\theta_0} \quad (7)$$

图 2 表示第 50 组丘陵地形数据的处理结果(速度 116 米/秒,时间 20 秒,采样率 1KHz)。其中 (a) 为散射系数随入射角的变化; (b) 为数据统计值与四种概率分布拟合曲线的比较; (c) 为对应的距离-多普勒杂波图。

表 1 散射系数模型参数及标准差

地形	一次模型			n 次模型			指数模型		
	γ (dB)	Std (dB)	5% γ (dB)	γ (dB)	n	Std (dB)	γ (dB)	θ (deg.)	Std (dB)
渭河平原	-12.08	3.76	-6.71	-8.23	1.63	2.12	-5.09	64.8	2.32
黄土丘陵	-12.94	4.04	-7.83	-9.10	1.85	1.72	-2.03	17.6	2.13
秦岭山区	-11.84	5.15	-6.46	-7.71	1.53	3.83	-5.22	35.2	4.08
混合地形	-11.92	3.53	-6.66	-11.1	1.00	2.66	-4.63	27.8	2.55

表 2 Weibull 分布的 K 分布形状参数

地形	Weibull 分布		K 分布	
	Mean	Std	Mean	Std
渭河平原	1.73	0.18	3.33	1.90
黄土丘陵	1.81	0.19	4.36	2.07
秦岭山区	1.82	0.12	4.23	2.07
混合地形	1.78	0.17	3.94	2.46

幅度起伏小;而丘陵和山区的趋势要缓且有不规则的起伏。

(3) Log-normal 分布明显不适合大多数测量数据,而 Weibull 和 K 分布与数据吻合较好, Rayleigh 分布介于二者之间。分布参数值与距离或入射角没有明显关系。

(4) 数据变化接近 n 次常数 γ 模型,一次模型误差较大。

(5) 距离-多普勒频谱图与天线方向性和地形相关性较好。

杂波幅度分布的长拖尾与 Weibull 和 K 分布的形状参数

有关,表 2 是该参数不同地形的平均值和标准差。

表 2 看出,对于所测山区和丘陵地形两种分布形状参数接近,与平原相比,均值和偏差明显增大,说明形状参数随地形的起伏增大而增大,较长拖尾可能引起雷达较大虚警率。

3.3 与散射系数理论模型的比较

在随机粗糙面的高度起伏 Gaussian 概率密度模型和 Gaussian 或指数相关模型假设下,根据 Kirchhoff 和 SPM 近似可得到散射系数表达式^[1,6]:

$$\sigma_{pp}^0 = |R_p(\theta)|^2 2k^2 \cos^2 \theta \exp[-(2k \cos \theta)^2] \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2k \cos \theta)^{2n}}{n!} \cdot W^{(n)}(2k \sin \theta) \quad (8)$$

式中 $W^{(n)}(\cdot)$ 为表面 Gaussian 或指数相关函数 n 次方的 Fourier 变换,其中 σ 和 L 分别是起伏表面高度标准差和相关长度, $R_p(\theta)$ 为面反射系数。

对于二维起伏表面 $z(x, y)$,若任意两点 (x, y) 、 (x', y') 之间满足以下分布概率关系,则称为分形布朗运动 (fBm) 表面^[6]:

$$P\{z(x, y) - z(x', y') < \zeta\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} s \tau^H} \int_0^\zeta \exp\left[-\frac{\zeta^2}{2s^2 \tau^{2H}}\right] d\zeta \quad (9)$$

其中 $\tau = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}$, H 为 Hurst 系数, s 为实数 (单位: $m^{(1-H)}$); 当 $0 < H < 1$ 时,上式存在且 fBm 表面具有自相似性,即若 $\Delta z(\tau) = z(x, y) - z(x', y')$,则对于 $a > 0$, $\Delta z(a\tau)$ 和 $a^H \Delta z(\tau)$ 的统计量相同,表面分形维数为: $D = 3 - H$ 。fBm 是非平稳过程,但它在固定水平间隔 τ 上是平均值为 0,方差为 $T^{(2-2H)} \tau^{2H}$ 的平稳各同性 Gaussian 过程。

已经表明, fBm 模型在一定尺度 $\tau_{\min} < \tau < \tau_{\max}$ 范围内可以有效描述自然表面的起伏和统计特征。基于该几何模型,可得到散射系数的解析表达式:

$$\sigma_{pp}^0 = \frac{|R_p(\theta)|^2 k^2 T^2 \cos^2 \theta}{H} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n (2k T \sin \theta)^{2n}}{2^{2n} (n!)^2} \cdot \frac{\Gamma((n+1)/H)}{(\sqrt{2} k T \cos \theta)^{(2n+2)/H}} \quad (10)$$

利用以上的散射系数 Kirchhoff 近似解,通过数值计算,调整其中的分形参数 T 、 H 或粗糙度参数 σ 、 L ,与前面得到的常数 γ 模型及数据进行了比较,结果示于图 3,同时对散射系数指数模型的变化也绘于图中(符号“ ∇ 、 Δ ”代表实验数据)。

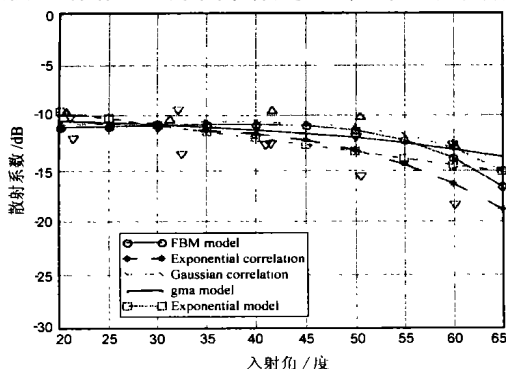


图 3 散射系数模型与数据的比较

通过分析和比较可以看出:通过调整模型参数, fBm 分形模型和 Gaussian 模型都能在一定入射角范围内与数据和经验模型基本吻合,模型适用于约 20 ~ 60 范围。实用时,为了在较宽角度范围内应用简便的常数 γ 模型,可以通过 n 次模型来更好地拟合随角度的变化关系。

4 讨论

根据统计分析结果,机载雷达杂波统计特性与地形类型有关,但即使同一类型的地物,其杂波特性在不同测量区间也不尽相同;另一方面,地形地物明显不同的区域,散射特征却有可能接近,这说明微波电磁散射特性具有局域不均匀性和非线性动态复杂性。研究机载雷达环境特性需要从总体上把握地形与杂波特性的关系,同时还要注意杂波在短期或近距离内的可能较大的不规则变化。因此,机载雷达特别需要采用自适应信息处理技术进行有效的杂波抑制,达到在多变复杂环境中检测目标的目的。

致谢:作者对课题组和 14 所机载杂波雷达研制及实验人员表示感谢!

参考文献:

- [1] F T Ulaby, R K Moore, A Kung. Microwave Remote sensing Vol. II: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory [M]. Artech House, Inc., 1982.
- [2] M W Long. Radar Reflectivity of Land and Sea [M]. Artech House, Inc., 1983.
- [3] Luo Xianyun, Zhang Zhongzhi, Yin Zhiying, Sun Fang, Kang Shifeng, et al. Measurement of backscattering from sea with an airborne radar at L-band [C]. Proceedings of SPIE, Microwave Remote Sensing of the Atmosphere and Environment, Beijing, China, 15 - 17 September 1998: 218 - 225.
- [4] 康士峰, 罗贤云, 葛德彪, 张忠治. 任意姿态机载 PD 雷达三维地杂波算法研究 [J]. 电子学报, 2000, 28(3): 21 - 24.
- [5] 康士峰, 葛德彪, 张忠治. 机载杂波测量雷达的有源绝对校准技术研究 [J]. 电子学报, 2000, 28(12): 28 - 31.
- [6] G Franceschetti, A Iodice, M Migliaccio. Scattering from natural rough surfaces modeled by fractional Brownian motion two-dimensional processes [J]. IEEE Trans. on AP, 1999, 47(9).

作者简介:



康士峰 男, 1966 年 7 月生于河南, 高级工程师, 中国电子学会高级会员。1987 年在成都电讯工程学院获工学学士学位, 1993 年在中国电波传播研究所获工学硕士学位, 2001 年 3 月获西安电子科技大学博士学位。主要从事电磁散射理论、雷达杂波测试和模拟工作。

张忠治 男, 1938 年 12 月出生。研究员, 总装目标与环境特性专业组成员。主要从事海面散射理论、微波遥感、信号处理及其在雷达系统中的应用研究。