

L 波段小擦地角海杂波幅度统计特性研究

张玉石^{*①} 许心瑜^② 尹雅磊^② 李慧明^② 吴振森^①

^①(西安电子科技大学理学院 西安 710071)

^②(中国电波传播研究所 青岛 266107)

摘要: 为了研究 L 波段小擦地角海杂波幅度统计特性及其在不同海洋参数条件下的差异, 该文结合海杂波实测数据, 选取适当的拟合优度检验准则, 对比分析给出了不同波高和风向条件下 Rayleigh, Weibull, Log-normal, K 分布等经典统计分布模型, 以及典型参数条件下 Pareto 分布在 L 波段小擦地角海杂波建模中的拟合效果, 可为雷达目标检测中杂波模型的选择提供参考, 提高海洋环境背景下目标检测的适应能力。

关键词: 雷达信号处理; 海杂波; 幅度统计特性; K 分布; Pareto 分布

中图分类号: TN959.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)05-1044-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01139

Research on Amplitude Statistics of L-band Low Grazing Angle Sea Clutter

Zhang Yu-shi^① Xu Xin-yu^② Yin Ya-lei^② Li Hui-ming^② Wu Zhen-sen^①

^①(School of Science, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China)

Abstract: In order to investigate amplitude statistics and variation under different ocean parameters of L-band low grazing angle sea clutter, in this paper, based on the L band real sea clutter data collected in different wave height and wind direction and proper goodness of fit rules, fitting result of Rayleigh, Weibull, Log-normal, K-distribution and Pareto distribution in modeling low grazing angle data are compared. The applicability of the above models are discussed. It can provide reference for the selection of clutter model in radar target detection, improve the adaptability under maritime environment of target detection.

Key words: Radar signal processing; Sea clutter; Amplitude distribution statistics; K distribution; Pareto distribution

1 引言

对于工作在下视模式的雷达而言, 海杂波的存在对雷达目标检测、定位跟踪等性能都会产生影响。国内外许多学者致力于海杂波数据分析、杂波背景下的目标检测算法等研究^[1-4]。海杂波的统计分布模型在雷达检测包括恒虚警(Constant False-Alarm Rate, CFAR)处理器的最佳化中, 特别是面对现代目标隐身技术和超低空突防的威胁时, 愈发显得重要。而处于复杂的海洋环境, 海杂波统计特性可能在不同的海洋参数取值下会有明显差异, 包括风速、风向、波高等。在雷达的使用过程以及后续的性能改进中, 对海杂波的特性都需要更加全面深入地了解。

关于海杂波幅度统计分布, 随着雷达分辨率提

高后, 分布函数表现出较长的拖尾, 出现了对数正态(Log-normal)分布, 韦布尔 (Weibull)分布, K 分布等描述海杂波幅度统计特性的模型。其中 K 分布从海杂波构成的物理机制出发, 不仅在幅度分布上较好地描述了海杂波的拖尾特性, 还能够揭示海杂波运动的物理意义, 近年来已广泛应用于地海杂波建模^[5-7]。高分辨雷达背景下, 海尖峰效应突出, 为了更精确地与观测结果相吻合, 文献[8]和文献[9]分别提出 KA 分布可建模具有尖峰的海杂波, 对于杂波建模精确度确实有很大的提高, 但是过于复杂的杂波模型会给雷达检测应用带来很大的数学运算难度。Farshchian 等人^[10]以及 Weinberg^[11,12]将广义 Pareto 分布用于建模高分辨 X 波段海杂波数据, 得到了比传统模型更好的拟合效果, 且较少的模型参数在雷达检测应用上具有较大优势。

海杂波的幅度分布统计特性很难采用具有普适性的概率分布密度函数, 但根据不同参数条件灵活

选择适当模型,可在特定条件下更精确地逼近真实的数据特性,因此研究杂波统计分布模型在不同条件下的拟合效果及在特定条件下的杂波建模具备较强的实用性。幅度分布参数估计方法以矩估计法和最大似然估计法为主。最大似然估计方法估计精度较高,但数学计算复杂。矩估计法基于数理统计,估计算法简单,但需要一定数量的样本值,估计值精度相对较低。K分布由于难以得到最大似然估计的闭式解,最常采用的是矩估计方法,现有的方法包括一阶矩二阶矩方法、二阶矩四阶矩方法、分数阶矩方法、线性域一阶矩对数域一阶矩方法以及Gamma近似估计方法等^[13,14]。

国内关于海杂波特性的研究多集中于理论仿真研究,部分单位利用国外IPIX雷达等实测数据进行分析或是结合自身研究任务需要进行了少量杂波测量工作,多涉及X波段^[15,16],S波段^[17]等,L波段海杂波测量及统计建模相较匮乏。本文基于L波段小擦地角海杂波实测数据,分析不同海洋参数条件下Rayleigh, Weibull, Log-normal, K分布等典型幅度分析模型的幅度拟合效果,并利用Pareto分布来建模多种典型条件下的L波段小擦地角海杂波数据并进行了该模型的适用性分析,可有助于雷达设计中杂波模型优化选择,提高目标检测能力。

2 Pareto分布

Pareto分布已广泛用于不同领域的重拖尾问题,包括物理学、经济学、水文学、地震学等。海杂波可视为平均回波强度很小但是会突发海尖峰的强回波现象。对于这类情况,Pareto分布比传统的泊松分布和二项式分布更精确。

广义Pareto分布的概率密度函数(PDF)定义为^[10]

$$f_{GP}(z) = \frac{1}{\lambda} \left(1 - k \frac{z}{\lambda}\right)^{\frac{1}{k}-1} \quad (1)$$

式中 k 为形状参数, λ 为尺度参数。 z 的取值为

$$z = \begin{cases} [0, \infty), & k \leq 0 \\ \left[0, \frac{\lambda}{k}\right], & k > 0 \end{cases} \quad (2)$$

当 $k=0$ 时,广义Pareto分布表现为以 λ 为均值的指数PDF的形式;当 $k<0$ 时,广义Pareto分布表现为Pareto分布的形式;当 $k=1$ 时,表现为 $[0,\lambda]$ 上的均匀随机变量。 z 表示强度。Pareto分布也可表示为如式(3)的Gamma分布和指数分布的复合形式。

$$f_P(z; k) = \int_0^\infty f_E(z; \xi) f_G(\xi; k, \lambda) d\xi \quad (3)$$

式中 f_E 为以 $1/\xi$ 为均值的指数PDF, f_G 为参数为 k 和 λ 的GammaPDF。

为得到Pareto分布的参数,采用最大似然估计(MLE)。对于实际的海杂波数据,MLE比矩估计方法均方差更小。

对于独立同分布的样本,如果 N 个独立样本 z_1, z_2, \dots, z_n 服从参数 θ 的某种分布,则其似然函数为

$$L(\theta) = \prod_{n=1}^N f_Z(z_i; \theta_{ML}) \quad (4)$$

其中 θ 的最大似然估计为

$$\theta_{ML} = \arg \max_{\theta} L(\theta) \quad (5)$$

对于广义Pareto分布,根据式(4)和式(5),可采用Nelder-Mead算法,通过一个约束最优化问题得到MLE。

3 拟合优度检验

杂波分布模型在不同环境条件下表现出不同的拟合效果。为了确定一个与给定杂波幅度数据拟合效果最好的模型,则须先定义一个能反映模型与数据拟合程度的统计量,即为统计假设检验中拟合优度检验的问题。本文采用以下几种检验准则:

(1) CV(Cramer-Von)距离^[18]

$$d_{CV}^2 = N \int_{-\infty}^{\infty} \left| F_X(x) - \hat{F}_X(x) \right|^2 dx \quad (6)$$

式中 $F_X(x)$ 为预设分布的累积分布函数(CDF), $\hat{F}_X(x)$ 为实测数据CDF。与KS检验相比,CV距离在计算实测数据的CDF时对样本统计独立性要求不高,对于某一预设分布,若其CDF与实测数据CDF的距离小于其它分布函数的CDF与实测数据CDF的距离,则其与实测数据拟合得更好。

式(6)中的积分可按式(7)的估计方法得到

$$d_{CV}^2 = \frac{1}{12N} + \sum_{i=1}^N \left| F_X(X_{(i)}) - \frac{2i-1}{2N} \right| \quad (7)$$

式中 $X_{(i)}$ 表示随机变量集合中第 i 个有序统计量。

(2) Chi方检验^[19]

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^K \frac{(f_i - N/K)^2}{N/K} \quad (8)$$

式(8)中, f_i 为幅度在第 i 个等概率间隔的观测的杂波样本的数目, N 为构成直方图的幅度样本的总数目, N/K 为统计模型在每个间隔中期望出现数目。 χ^2 值越低,拟合效果越好。

(3) 统计量 D ^[18]

$$\begin{aligned} D &= \max_x \{ |P_n(x) - P(x)| \} \\ &= \max_i \{ |i/n - P(x_i)| \} \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $P(x)$ 为预设分布的CDF, $P_n(x)$ 为实测数据的

CDF。

(4) 二次统计量 Q_0 [18]

$$Q_0 = n \int_{-\infty}^{\infty} (P_n(x) - P(x))^2 dP(x) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{i}{n} - P(x_i) \right)^2 \quad (10)$$

式中 $P(x)$ 和 $P_n(x)$ 的含义同(3)。

(5) 似然率 根据 Iskander 等人 [20] 文中定义使用各分布的“似然率”来进行判别, 即

$$R_{LL} = \prod_{i=1}^N \text{PDF}_I(E_i, \theta_I) / \prod_{i=1}^N \text{PDF}_L(E_i, \theta_{MLL}) \quad (11)$$

式中 R_{LL} 表示某种分布相对于 Log-normal 分布的似然率, 当 $I = R, W, K$ 时分别表示 Rayleigh 分布, Weibull 分布和 K 分布, θ_I 为各种具体分布模型中的参数。如果 R_{LL} 均小于 1, 则最佳分布模型为 Log-normal 分布; 否则, 似然率最大对应的分布为最佳的分布模型。

由于各个检验准则的考核点有所差别, 不同的检验准则得到的最优拟合模型可能不同, 因此本文选用以上多种准则, 综合得到一个最佳判定。

4 数据分析结果

本文所使用的海杂波数据来自于中国电科 22 所 L 波段岸基海杂波观测雷达 [21]。通过数据预处理, 得到 560 个有效分析区域数据, 每个区域覆盖多个距离门及多次测量, 各区域对应不同的海洋环境参数。在分析某一参数对海杂波幅度统计分布的影响时, 首先进行参数筛选, 尽量保证其它重要参数相同或接近。分别在不同波高及不同风向下分析 Rayleigh 分布, Weibull 分布, Log-normal 分布, K 分布等与实测数据的拟合效果, 并分析 Pareto 分布在各典型参数组合下的拟合结果。

4.1 不同海洋参数下的幅度特性分析

(1) 不同波高情况 波高与海况等级有着直接

的联系, 不同海况等级下海面粗糙程度明显不同, 海杂波的幅度分布类型也会受到直接的影响。本次选用的数据包括 0.2 m, 0.8 m 及 1.6 m 波高 3 种情况, 对应海况等级分别为 2, 3, 4 级。极化方式均为 VV 极化, 距离分辨率为 3 m, 擦地角位于 $1.8^\circ \sim 2.3^\circ$ 之间。拟合结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出, 实测数据统计分布明显偏离 Rayleigh 分布, 特别是在拖尾部分即低虚警(Pfa)区域。对 3 个区域内多组数据分别进行幅度拟合, 拟合优度检验结果如表 1 所示。

表1 不同波高(m)下多组数据幅度统计拟合结果分布比例

	波高 0.2	波高 0.8	波高 1.6
Rayleigh 分布	0	0	0
Weibull 分布(%)	88	94	100
Log-normal 分布	0	0	0
K 分布(%)	12	6	0

由表 1 的拟合结果可以看到, 在其它测量参数不变的情况下, 幅度拟合结果稳定, 不符合 Rayleigh 分布和 Log-normal 分布, 符合 Weibull 分布或 K 分布。理论上 Weibull 分布和 K 分布在某些参数下会出现非常接近的情况 [12], 由图 1 也可以看出, 两种分布曲线非常接近, 在本次采用的 3 m 分辨率海杂波数据范围内, 波高对幅度统计分布的影响较小。

(2) 不同风向情况 在现有数据中选取极化, 分辨率相同且波高接近的条件下, 近似为逆风、顺风 and 侧风的 3 类数据进行比较。测试参数均为 0.75 m 距离分辨率, VV 极化, 波高在 0.5~0.6 m 之间, 擦地角范围接近。相同擦地角下单组数据拟合结果如图 2 所示。

对 3 种风向下多组数据分别进行幅度拟合, 并进行拟合优度检验, 结果如表 2 所示。

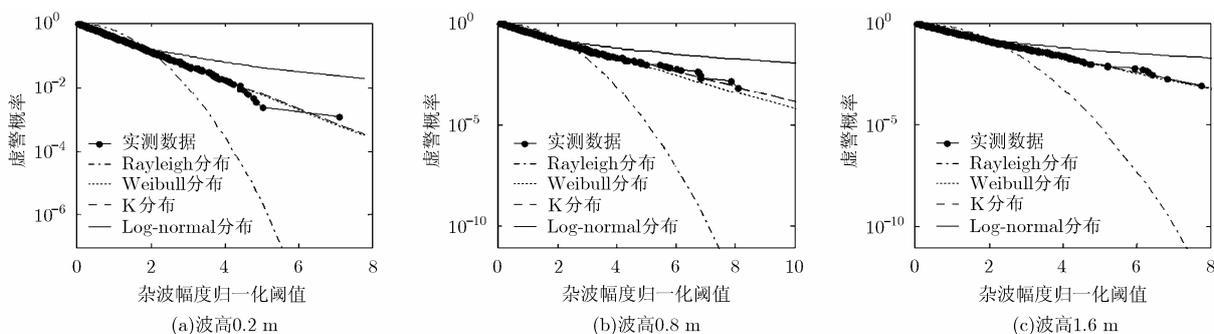


图 1 不同波高情况下虚警概率-阈值变化曲线

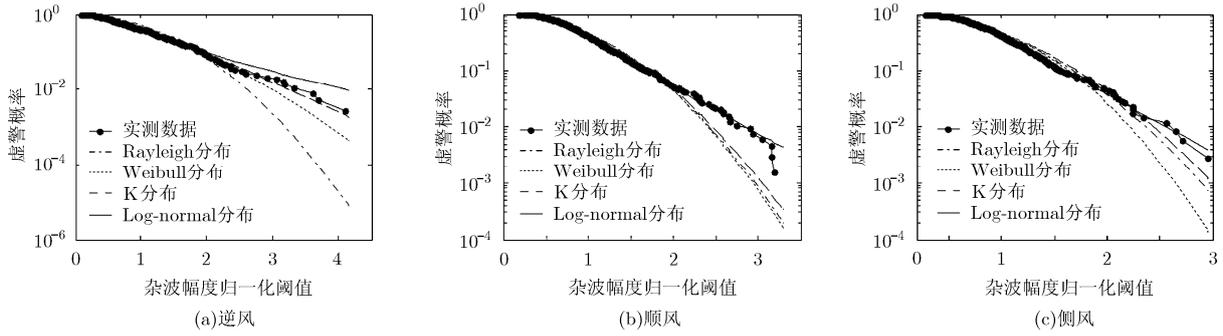


图 2 不同风向下虚警概率-阈值变化曲线

表 2 不同风向下多组数据幅度统计拟合结果分布比例(%)

	逆风	顺风	侧风
Rayleigh 分布	0		0
Weibull 分布	1	<1	3
K 分布	45		0
Log-normal 分布	54	99	97

由于选用了分辨率较高的 0.75 m 分辨率测试数据，所以总体来看，3 种风向下基本都不符合 Rayleigh 分布，特别是顺风和逆风条件，符合 Log-normal 分布的样本较多，其中以顺风和侧风状态更为明显；逆风方向在 Log-normal 分布数据集中最少，K 分布与逆风方向数据拟合相对较好；Weibull 分布在 3 个风向中，与侧风方向数据拟合较好。

4.2 Pareto 分布适用性

选取不同参数组合下的多组典型数据，采用 Pareto 分布进行幅度拟合，与 Weibull 分布，K 分布及 Log-normal 进行比较，拟合结果如图 3 所示。

由图 3 可以发现，对于分辨率相对较低(3 m)，VV 极化的情况，Pareto 分布与 K 分布及 Weibull 分布估计性能相当，建模效果较好，如图 3(a)中的较高海况和图 3(b)中的较低海况所对应的各条曲线所示。随着分辨率从 3 m 增至 0.75 m，Pareto 分布在整体区域特别是低 CDF 区域拟合效果越来越差，仅在拖尾区域与数据拟合较好，如图 3(c)所示，曲线前端与数据偏差很大，但在低虚警区域与数据偏差较小。

在 HH 极化条件下，海面较平静时杂噪比较低，幅度统计很难找到一个恰当的描述(如图

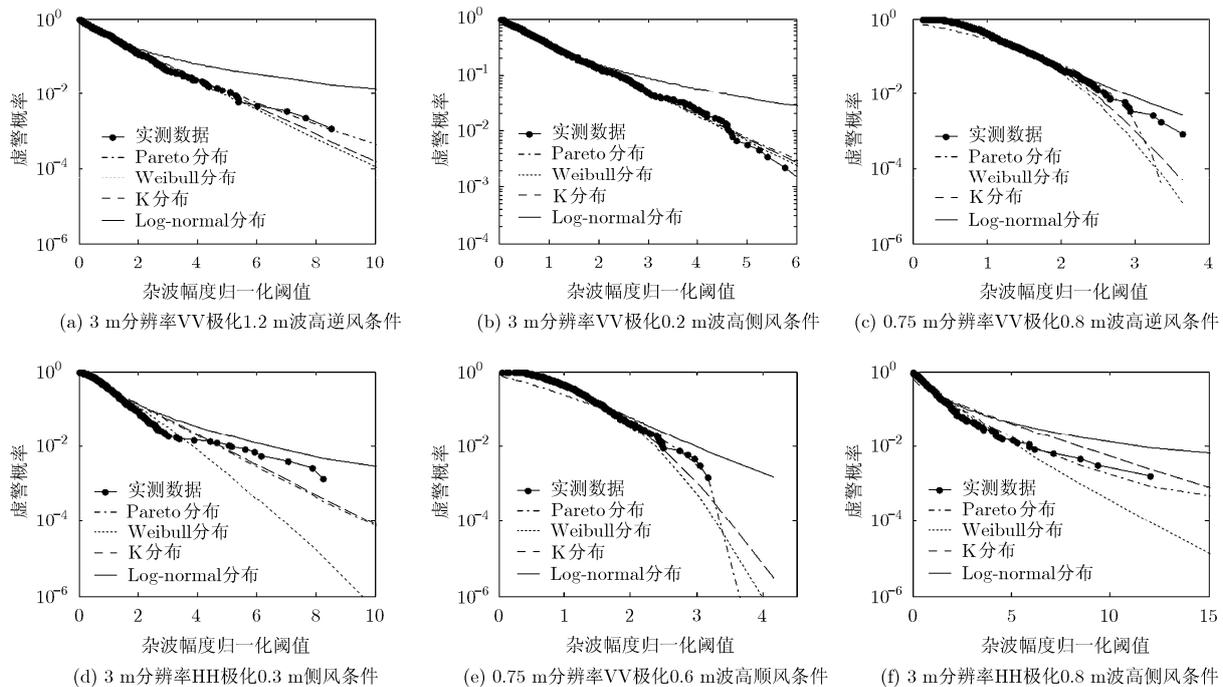


图 3 不同参数下虚警概率-阈值变化曲线

3(d)所示), 相对来讲, 拖尾处更偏向于 Log-normal 分布, 此时 Pareto 分布估计性能明显下降, 与 Weibull 分布和 K 分布相当。随着波高的增大, Pareto 分布在拖尾处与实测数据的拟合效果优于其它分布, 如图 3(f)所示。

顺风状态下, 杂波幅度分布整体上看更符合 Log-normal 分布, 如图 3(e)所示, Pareto 分布估计性能在低 CDF 区域严重偏离实测数据, 但在低虚警区域性能略微优于其它 3 种分布。

5 结束语

通过分析 L 波段高分辨小擦地角海杂波数据在不同海洋参数条件下幅度分布拟合效果, 表明在所采用数据覆盖的 2~4 级海况范围内, 波高的变化对幅度统计分布类型的判定影响较小, 不同风向的多组数据得到的各统计分布类型所占比例差别较大。在实测数据接近 Weibull 分布和 K 分布时, Pareto 分布可以达到较好的估计效果, 部分条件下低虚警区域拟合更优。在 Weibull 分布和 K 分布拟合效果下降时 Pareto 分布会偏离实测数据, 但在低虚警区域仍保持较好的拟合效果。

参考文献

- [1] Ward K D, Tough R J A, and Watts S. Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance[M]. London: The Institution of Engineering and Technology, 2006: 13-44.
 - [2] 刘宁波, 黄勇, 关键, 等. 实测海杂波频域分形特性分析[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(4): 929-935.
Liu Ning-bo, Huang Yong, Guan Jian, et al. Fractal analysis of real sea clutter in frequency domain[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(4): 929-935.
 - [3] 苏晓宏. 海杂波的特性分析与目标检测处理[D]. [博士论文], 大连海事大学, 2010.
Su Xiao-hong. Analysis of sea clutter characteristics and processing of target detection[D]. [Ph. D. dissertation], Dalian Maritime University, 2010.
 - [4] 张建, 关键, 董云龙, 等. 基于局部 Hilbert 谱平均带宽的微弱目标检测算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(1): 121-127.
Zhang Jian, Guan Jian, Dong Yun-long, et al. Weak target detection based on the average bandwidth of the partial Hilbert spectrum[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(1): 121-127.
 - [5] Roy L P and Kumar R V R. Accurate K-distributed clutter model for scanning radar application[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2010, 4(2): 158-167.
 - [6] Watts S. Modeling and simulation of coherent sea clutter[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(4): 3303-3317.
 - [7] Dong Y. Optimal coherent radar detection in a K-distributed clutter environment[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2012, 6(5): 283-292.
 - [8] Middleton D. New physical-statistical methods and models for clutter and reverberation: the KA-distribution and related probability structures[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1999, 24(3): 261-284.
 - [9] Ward K D and Tough R J A. Radar detection performance in sea clutter with discrete spikes[C]. International Radar Conference, Edinburgh, 2002: 253-257.
 - [10] Farshchian M and Posner F L. The Pareto distribution for low grazing angle and high resolution X-band sea clutter[C]. IEEE Radar Conference, Washington, 2010: 789-793.
 - [11] Weinberg G V. Assessing Pareto fit to high-resolution high-grazing-angle sea clutter[J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(8): 516-517.
 - [12] Weinberg G V. Constant false alarm rate detectors for Pareto clutter models[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2013, 7(2): 153-163.
 - [13] Dong Y H. Clutter spatial distribution and new approaches of parameter estimation for weibull and K-distributions[R]. Report of the Defence Science and Technology Organisation, Australia, 2004.
 - [14] 石志广, 周剑雄, 付强. K 分布海杂波参数估计方法研究[J]. 信号处理, 2007, 23(3): 420-424.
Shi Zhi-guang, Zhou Jian-xiong, and Fu qiang. Parameter estimation study of K-distributed sea clutter[J]. *Signal Processing*, 2007, 23(3): 420-424.
 - [15] 张翼飞, 冯讯, 胡林华, 等. 海杂波实测数据的改进 K 分布模型分析[J]. 空军雷达学院学报, 2009, 23(6): 426-428.
Zhang Yi-fei, Feng Xun, Hu Lin-hua, et al. Analysis of improved K-distribution model for measured data of sea clutter[J]. *Journal of Air Force Radar Academy*, 2009, 23(6): 426-428.
 - [16] 刘海燕. 海杂波背景下恒虚警率目标检测方法研究[D]. [硕士论文], 西安电子科技大学, 2012.
Liu Hai-yan. Study on CFAR target detection method in sea clutter[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2012.
 - [17] 姜斌, 王宏强, 黎湘, 等. S 波段雷达实测海杂波混沌分形特性分析[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(8): 1809-1812.
Jiang Bin, Wang Hong-qiang, Li Xiang, et al. The analysis of chaos and fractal characteristic based on the observed sea clutter of S-band radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(8): 1809-1812.
 - [18] D'Agostino R B and Stephens M A. Goodness of Fit Techniques[M]. New York: Marcel Dekker, 1986.
 - [19] Chan H C. Radar sea-clutter at low grazing angles[J]. *IEEE Proceedings F Radar and Signal Processing*, 1990, 137(2): 102-112.
 - [20] Iskander D R and Zoubir A M. Estimation of parameters of the K-distribution using higher order and fractional moment[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(4): 1453-1457.
 - [21] Zhang Y S, Wu Z S, Zhang Z D, et al. Applicability of sea clutter models in nonequilibrium sea conditions[C]. IET International Radar Conference, Guilin, 2009: 12.
- 张玉石: 男, 1978年生, 高级工程师, 博士生, 研究方向为地海杂波测试系统与方法、海杂波特性与建模等。
许心瑜: 女, 1982年生, 工程师, 硕士, 研究方向为海杂波数据处理及特性研究。
尹雅磊: 女, 1982年生, 工程师, 硕士, 研究方向为雷达信号处理、杂波数据模拟及分析。
李慧明: 男, 1981年生, 工程师, 研究方向为地海杂波测试与软件及地海杂波数据库与应用技术。
吴振森: 男, 1946年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为随机介质、非均匀介质中电磁(光)波的传播与散射、目标激光散射特性和电磁散射等。