雷达海杂波统计特性建模研究

尹志盈,张玉石

(中国电波传播研究所 电波环境特性及模化技术国防科技重点实验室, 山东 青岛 266107)

摘要:介绍了海杂波统计特性建模的幅度特性、多普勒谱及空间相关这三个方面的研究状况,对各种建模 的思路和模型效果进行了对比总结。对于幅度均值已有多个较为成熟的模型,但适用范围不同,结果差异 也很大。幅度分布建模重点解决拖尾问题,复合建模是趋势。除平均谱外,开始研究短时多普勒谱。空间 相关性建模主要建立空间相关长度与雷达及海洋参数间的联系,但是研究还不够全面。总的来看,已由单 纯经验建模发展为力图在机理研究指导下有一定物理意义的建模。尽管海杂波建模效果愈来愈接近实际, 但建模依然存在诸多问题。 关键词:海杂波;建模;统计特性;幅度分布;多普勒谱

 、政,定候,死日有住,福度为师,夕雪初日

 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.07.006

 中图分类号: TJ02; TN011

 文献标识码: A

 文章编号: 1672-9242(2017)07-0029-06

Radar Sea Clutter Modeling of Statistical Characteristic

YIN Zhi-ying, ZHANG Yu-shi (National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China)

ABSTRACT: The paper introduced research states on radar sea clutter modeling of statistical characteristics from amplitude characteristic, Doppler spectrum and space correlation, compared and summarized various thoughts and model effects of modeling. There were mature models on the average amplitude value; but their range of application was different and their results were much different. The molding of amplitude distribution ware targeted to solve the trailing issue. It was a tendency to carry out compound modeling. In addition to the average spectrum, study of short-time Doppler spectrum was also started. The modeling of space correlation aimed to establish the relationship between parameters of spatial correlation length and radar and sea, but it was not comprehensive enough. In a word, it has been developed from simple experience modeling to that with certain physical meaning under the guidance of sea clutter mechanism study. Although modeling effects become closer and closer to the reality, but many problems still exist.

KEY WORDS: sea clutter; modeling; statistical characteristic; amplitude distribution; Doppler spectrum

海杂波是雷达波与海洋环境相互作用所产生的 回波信号,海杂波是雷达下视探测跟踪海面目标时无 法回避的问题,直接影响雷达对海探测跟踪和识别性 能。

海杂波与海面形态(海浪类型、浪高、海浪运动 方向等)、海域、雷达系统参数以及探测条件等紧密 关联^[1]。由于海面波浪运动的复杂性,海杂波在时空 上呈现随机、多变的特点。作为雷达系统设计者,为 了设计适当的信号处理方法及预测不同条件下的雷 达性能,需要全面了解海杂波的各种特性,并期望精 确地对其进行模型化描述^[2]。

描述海杂波的统计特征量主要有杂波强度(幅度

收稿日期: 2017-03-24; 修订日期: 2017-04-10

作者简介:尹志盈(1971-),男,湖北汉川人,硕士,研究员,主要研究方向为地海面雷达杂波测量、建模及其应用。

特性)、频谱和空间相关性。杂波强度反映了杂波的 大小,影响目标探测的信杂比;频谱反映了杂波强度 随时间变化的快慢,影响对运动目标的检测性能;空 间相关性反映了杂波在空间上的依赖关系,决定了雷 达探测目标时的杂波抑制效果^[3-6]。

随着雷达技术发展和需求的不断变化,对海杂波特性的需求由粗放不断演化为定量精细化的掌握。随着测量数据的不断积累^[7-11]和海杂波机理研究^[12-14]的深入,对雷达海杂波特性的统计建模研究也越来越 逼近实际。

1 海杂波幅度特性研究

海杂波幅度特性包括幅度均值特性和幅度分布 特性,幅度均值特性(又称散射系数)是反映海杂波 平均回波强度的重要指标。通常利用海杂波实测数 据,结合海杂波形成机理,建立幅度均值随雷达参数 (如频率、极化、擦地角等)和海洋环境参数(如风 速风向、浪高浪向等)变化的经验或半经验模型。幅 度分布特性是指海杂波幅度的统计概率分布,常用概 率密度函数(PDF)描述,是反映海杂波回波强度起 伏特性的重要指标。

1.1 海杂波幅度均值特性

由于海面状态随气象条件千变万化, 描述海面的 环境参数较多, 且影响海杂波强度的雷达系统参数与 海洋环境参数之间存在着复杂非线性依赖关系。因 此, 如何准确建立这些参数与海杂波之间的联系仍是 个难题^[15]。特别是当雷达工作在小擦地角状态下, 海 杂波特性更加复杂。国外学者在 20 世纪 70 年代就曾 提出了 GIT 模型^[16], 后来相继提出了 TSC 模型^[17]、 HYB 模型^[18]、SIT 模型^[19]、NRL 模型^[20-21]等。

这些模型中,最早提出的模型为 GIT 模型,属于 半经验模型,也是一个被广泛接受的模型。其他模型 有的是在其基础上提出的,如 TSC 模型和 HYB 模型 的一些因子和函数形式与 GIT 模型相类似。NRL 模 型和 SIT 模型属于纯经验模型,完全从实测数据出 发,没有物理含义。除 NRL 模型外,其他几个模型 或多或少在某些情况下存在着随频率变化的不连续 情况,而且这些模型的建立也仅是采用部分波段下的 数据,在其他波段下的适用情况存在不确定性。模型 中的输入参数较多,且标准不一,输入条件可变范围 大,这将导致模型使用者的盲目性。由于海面状态多 变,实测海杂波数据在很多情况下兼有非充分发展海 面与充分发展海面的结果,而模型中仅采用充分发展 海表面函数关系,与实际情况存在偏差。鉴于以上原 因,各模型对散射系数的预测结果存在较大偏差,这 种差异在某些情况下是不容忽视的,在模型的使用过 程中必须引起注意。

上述几个模型适用角度范围较大,但是函数形式 复杂。在中等擦地角范围,工程上也常使用几个简单 的模型,如指数函数模型^[22]、常数伽马模型^[23]。 Morchin^[23]在详细讨论了海杂波散射系数在擦地角 三个区域内的特性及模型描述基础上,给出了一个适 用于宽范围擦地角条件的模型。

针对传统 GIT 模型在较低风速和较高风速情况 下估计海杂波幅度均值偏小这一情况,提出对 GIT 模型中的风速因子进行修正。通过引入两个临界风速 因子和两个相对斜率调整因子,导出散射系数随风速 变化的非线性关系^[24]。该修正模型的5个输入参数相 对灵活,可以用于建模不同的雷达系统及环境条件下 获得的海杂波幅度均值特性,而且该模型仍保留了 GIT 模型中与波长、擦地角之间的关系。

1.2 海杂波幅度分布特性

海杂波幅度的随机起伏性可以用雷达接收机包 络检波器后的幅度概率密度函数(PDF)来描述。杂 波的起伏统计特性对恒虚警率检测器 (CFAR) 的设 计和杂波相消处理器输入信杂比的计算有重大影响。 关于海杂波幅度分布,传统的 PDF 分布模型有瑞利 分布、对数正态分布、韦布尔分布^[25-26]和 K 分布^[27] 等。这些分布模型虽然在一定程度上可以模拟海杂波 的非高斯特性,但对于高分辨、高海况、小擦地角等 情况下出现的海杂波幅度分布的重拖尾现象,这些模 型与实际会存在较大偏差。虽然与其他分布模型相 比,基于复合高斯建模思想的 K 分布具有更强的适 应性,但K分布假设相关平均强度调制一个 Gaussian 散斑分量,该分量对应于由毛细波引起的布拉格 (Bragg)散射。显然, K分布不能应用于破碎(Burst) 散射或空间上分布较窄的白浪(Whitecap)散射情况, 再则,还没有理论支持伽马分布对于相关调制强度 (有时也称作结构)具有较好的匹配性能。

为解决拖尾问题,人们相继尝试并发展了多种建 模方法,大致可归为三大类:一是对 K 分布复合高 斯建模思想的扩展,包括散斑分量仍采用瑞利分布, 而纹理分量则采用不同的分布形式,或者仍沿用两种 散射分量的乘积形式,但假设散斑分量不再服从瑞利 分布,散斑分量与纹理分量均可采用不同的分布形 式。这类建模方法简称为广义 K 分布。二是与海杂 波形成机理相结合,在 K 分布的基础上,同时考虑 布拉格散射、破碎波散射和白冠散射,发展形成的 KA 分布^[28]、KK 分布^[29]、WW^[29]分布等复合结构建 模方法。三是从纯数据统计角度出发,引入其他研究 领域的新方法,如 Pareto 分布^[30]、极值建模方法^[31] 等。某些情况下,如当分辨率进一步提高,分辨单元 变得非常小时,散斑分量不再满足中心极限定理,此 时可采用一种广义复合概率分布(GC 分布)^[32-35] 进行描述。

当散斑和调制分量的功率参数相同时,可得到广 义 K 分布的概率密度函数(GK-pdf)。在没有热噪声 的情况下,GK-pdf 取特定的形状参数和功率参数, 可得到 K 分布和韦布尔的概率密度函数(K-pdf和韦 布尔-pdf)。当散斑分量的形状参数取为1,纹理分量 的功率参数取为 2 时,可得到一个四参数的韦布尔-散斑和伽马-均值的复合模型的 pdf(包含热噪声)。 描述调制分量的 GΓ-pdf 在形状参数较大时表示杂波 均值几乎为常量(去相关周期大于观察区域),因此 GC-pdf 近似为斑点的 pdf,即为广义伽马分布的概率 密度函数(GΓ-pdf)。

GC 分布认为散斑分量和纹理分量均服从广义伽 马分布,其概率密度函数(GC-pdf)为一个多参数模 型,完整的表达式中包含 6 个参数(包含热噪声分 量),这些参数的值与杂波结构严格相关。功率参数 的增加对应杂波尖峰特性变弱,调制分量变弱。形状 参数主要影响分布的拖尾。两者的乘积最终确定 GC-pdf和杂波结构的斑点与调制分量的去相关常数。

D.Middleton^[28]借鉴接收机噪声的 A 类模型(即 Class A),提出海杂波幅度分布建模(称之为 KA 分 布)思想:少数强回波(离散尖峰)的贡献缘于破碎 波事件,这种离散尖峰可由 Class A 模型描述;海杂 波的主要贡献来自于海面大量的反射小平面,这种大 量的小散射体,按中心极限定理(CLT)产生一个高 斯干扰,其功率随海面的运动而变化,可用伽马分布 较好地描述。当尖峰存在时, KA 分布可以很大程度 上改善拖尾区域与杂波数据的拟合效果。由于 KA 分 布不能表示为闭型,其 PDF 和 CDF 需要数值计算, 要求资源高,实际应用难以实现。借鉴 KA 分布建模 思想, Dong^[29]提出了 KK 分布模型。KK 分布为两个 K 分布的混合,一个用于海面布拉格/白冠基本散射 描述,另一个用于海尖峰描述。Dong 在提出 KK 分 布时,也提出了采用类似 KK 分布结构的 WW (Weibull-Weibull)分布改善拖尾区域的匹配效果。

Pareto 分布已广泛应用于物理学、经济学、水文 学、地震学等领域。对于平均回波弱但存在猝发的尖 峰情况时, Pareto 分布具有比传统的泊松分布和二项 分布更精确的拟合度,适合于解决数值分布的重拖尾 问题。Farshchian 等人^[36]首次将 Pareto 分布用于小擦 地角高分辨率 X 波段海杂波建模,结果表明其性能 比传统模型(如韦布尔分布、K 分布等)具有更好 的拟合效果,与 KK 分布相当。

从微分角度, Pareto 分布与 K 分布之间的不同在 于 Pareto 分布中指数分布的均值受逆伽马分布调制, 而在 K 分布中是瑞利(包络)和指数(强度)的均 值受伽马分布调制。由于 Pareto 分布仅需估计两个参 数,相比于 KK 和 WW 分布,操作更简单。Pareto 分布在 CDF 临界值为 0.999 时与 WW 和 KK 分布等 5 参数分布的性能非常接近。

海尖峰在海杂波数据中表现出类似于冲激信号的特性,数学上的极值理论为这类冲激信号的分布问题提供解决思路。丁昊等人^[31]提出了包含海尖峰海杂波数据的极值建模方法,将海杂波数据分成两个数组,一组为含海尖峰样本数据,另一组为不含海尖峰样本数据。以海尖峰样本为研究对象,采用极值理论中的广义极值分布模型对海尖峰的幅度分布特性进行建模,采用传统的分布模型(如瑞利分布、K分布等)对不含尖峰的海杂波样本进行建模,借鉴复合结构建模方法,完成极值建模。

2 海杂波多普勒谱建模研究

海杂波谱特性用于表征海杂波时间序列在各频带上的能量分布。由于海面是运动的,海杂波谱将产生多普勒频移,所以也称为多普勒(Doppler)谱。 除受到雷达参数(如频率、极化、擦地角、方位角) 的影响外,海杂波的多普勒谱特性与海表面的运动和 扰动状态密切相关,雷达与海面散射体之间的相对运 动使得电磁波产生多普勒频移,而海面散射体运动的 随机性使得多普勒谱具有一定的展宽。根据海杂波多 普勒谱形成机理,对于不同的观测时间,海杂波多普 勒谱表现出不同的形状与非平稳特性。因此,海杂波 多普勒谱的建模主要分为以下两种情况。

针对平均多普勒谱形状的建模,即较长时间(通 常大于重力波周期, 秒级)海杂波谱的平均特性。早 期多采用指数、高斯或幂函数[37]对海杂波平均多普勒 谱拟合,但多数情况下拟合效果差。Lee 等人^[38]首先 采用多组实测数据分析的方式,研究了平均多普勒谱 形状的特点和规律,通过与海洋环境参数联合分析, 提出了将谱线形状分解为三个表征不同散射机制的 基函数建模方法,但模型形式及参数估计复杂,实际 应用困难。以此为基础, Walker 等人^[39-40]利用造浪 池数据分析了海浪从产生到破碎全过程的多普勒谱 变化特性,利用三个高斯函数分别表征布格拉、白浪 和破碎三种散射机制的谱分量,建立了一种简化的三 分量海杂波平均多普勒谱模型,在实际中得到广泛应 用。为了验证这种在造浪池条件下得到的模型的适用 性, Walker 利用 1996 年英格兰南海岸 Portland Bill 的崖顶雷达实测海杂波数据进行了对比分析,除了细 节(毛刺)和边缘拟合效果欠佳外,模型对谱的总体 形状刻画尚可, 表明 Walker 模型可以用于描述海杂 波谱的主要特征。与 Lee 谱模型相比, Walker 模型全 部采用高斯函数,模型形式简单,与视频数据结合, 侧重于对波浪散射的演化过程的推断与描述,对探寻

小擦地角海杂波谱特性具有推动作用。

针对短时动态多普勒谱建模,即较短时间内(通 常小于重力波周期,大于白浪和破碎散射的去相关时 间)局部谱形状及其变化特性。Miller 等人^[41-42]在 分析多波段雷达海杂波数据的基础上,建立了由两个 服从 Γ 分布的随机变量对高斯函数形式的谱结构进 行调制的短时多普勒谱模型。考虑到短时多普勒谱是 非高斯的, Ward 等人^[43-44]则借鉴采用复合 K 分布幅 度建模思想,利用两个高斯函数对谱形状进行描述的 短时多普勒谱建模方法。由于模型中假定海面的布拉 格散射谱分量具有零多普勒频移,且白浪散射和破碎 波散射共享相同的多普勒频移和展宽,因此会导致某 些情况下拟合精度不高的缺点。Ward 等人认为海杂 波的多普勒形状应建模为一个随机过程。如果多普勒 在信号时间周期 T 内形成,其中 T 比重力波调制短, 但比破碎波和白冠散射的去相关时间长,即在重力波 调制期间是时变的。Ward 半经验模型存在两个基本 假定,即布拉格散射分量与破碎波散射分量、白冠散 射分量相互独立,且布拉格散射具有零多普勒中心; 破碎波散射和白冠散射共享相同的多普勒偏移和带 宽。实际中,布拉格散射存在多普勒偏移,且偏移量 随着雷达波长的增加明显。破碎波散射伴随白冠散 射,且两者在多普勒频移、多普勒带宽上是不同的。 因此, Ward 半经验模型对短时多普勒谱的刻画与实 际是存在偏差的。

考虑到 Walker 模型和 Ward 模型存在的固有局限 性,张玉石等人^[45]将三个谱分量的谱强度假设为受谱 估计时间区间影响的时间随机变量,发展了一种海杂 波时变多普勒谱混合模型。与 Walker 模型和 Ward 模 型相比, 混合模型具有以下特点: Ward 短时动态谱 模型认为布拉格散射具有零多普勒频移,而混合模型 引入了布拉格散射的多普勒频移; Ward 模型假定破 碎波散射和白冠散射机制共同产生一个高斯谱分量, 破碎波散射和白冠散射具有相同的多普勒频移和展 宽,而混合模型考虑两种散射的产生机理和相关时间 差异,认为海杂波多普勒谱由来自布拉格、破碎和白 冠三种散射机制的三个谱分量组成; Walker 谱模型中 破碎波散射和白冠散射共享相同的多普勒频移,而混 合模型将破碎波散射谱分量的谱频移认为由重力波 相速度引起的频移和附加速度引起的频移两部分组 成。

3 海杂波空间相关性建模

空间相关性是指来自不同空间位置海杂波之间 的相关程度,包括距离向的空间相关性和方位向的空 间相关性。缺乏海杂波空间相关性了解将导致雷达目 标检测时 CFAR 中单元平均数选取的盲目性,从而无 法获取最优化的 CFAR 增益,使目标检测性能下降。 海杂波的空间相关由与海洋表面轮廓相关的海杂波 调制过程引起。当微波信号主要由毛细波散射(散斑) 引起时,重力波的波结构引起某单元平均功率的变化 (调制过程)。另一方面,在涌浪形成的条件下,调 制过程的空间自相关函数中会出现一个周期分量。关 于散斑的相关特性,Antipov^[46]指出相邻距离单元之 间,散斑分量建模是相互独立,海杂波的空间相关性 仅由调制过程的伽马分量决定。

海杂波空间相关性与海浪或者海面波的状态有 关,基于实测数据,Watts^[47]给出了海杂波在距离向 的相关长度与风速、重力加速度等参数之间的经验 公式。结合海杂波形成机理,关键等人^[48]假设海杂 波的纹理分量和散斑分量是统计独立的随机变量, 测量是在临界采样或者欠采样条件下获取的。即测 量数据的距离采样间隔等于或者大于雷达距离分辨 单元,纹理分量在距离向相关,而散斑分量在距离 向不相关,提出了一种基于纹理分量的海杂波距离 向相关建模方法。

4 结语

海杂波统计特性的研究经过长期的发展,建立了 多种模型,从最初对测量数据单纯的经验建模,到结 合海杂波形成机理的研究成果,力图使得建模的物理 意义更为明确,且力求模型效果与实际测量数据更为 吻合。幅度均值建模的研究较为深入,已有多个较为 成熟的模型,然而模型之间甚至在某些条件下存在极 大的差异,这给使用者选择带来极大的困惑,改进或 者修正不可避免。受到 K 分布建模的影响和启发, 幅度分布建模则有由简单分布向复合高斯分布进而 复合分布发展的趋势,其目的主要解决幅度分布拖尾 拟合精度差的问题,但模型的复杂度增加对应用并不 有利。多普勒谱的研究则在以前平均谱特性研究的基 础上,开始研究短时多普勒特性,对多普勒特性的刻 画势必更为丰富,但是多分量的谱模型对谱参数的估 计提出了挑战。海杂波的空间相关特性应该说研究在 相关函数的基本形式上取得了基本一致,目前开始了 建立空间相关长度与雷达及海洋参数关系的尝试,但 是效果还有待检验。也应该注意到,在上述三个方面 的建模研究中,幅度分布模型及多普勒谱模型主要还 是对谱函数形式的研究,而模型参数与雷达及海洋参 数间的关系还很少系统研究。同时建模一直追求的是 寻求普适性的模型,随着测量数据的不断丰富,模型 的适用性问题依然未见到曙光。既然每种模型都来自 于特定的数据或者特定的机理,那么有理由认为对条 件进行分类,然后分类建模也许是解决之道。

另一方面,海杂波统计特性的建模,其基本的假

设前提还是基于海面的平稳均匀,对于非充分发展海 面此前提并不成立。反常传输条件^[49]、高擦地角^[50] 和小擦地角、陆海交界的近海海域^[51]等条件下海杂波 特性建模问题仍然存在困难,海杂波特性建模研究任 重而道远。

参考文献:

- LONG M W. Radar Reflectivity of Land and Sea Third Edition[M]. Boston London: Artech House, 2001: 558.
- [2] WARD K D, WATTS S. Use of Sea Clutter Models in Radar Design and Development[J]. IET Radar Sonar Navig, 2010, 4(2): 146–157.
- [3] WARD K D, WATTS S, TOUGH R J A. Sea Clutter: Scattering, the K-distribution and Radar Performance: Institution for Engineering and Technology[M]. London, United Kingdom, 2006.
- [4] SKOLNIK M I. Radar handbook, second edition[M]. New York: McGraw-Hill, 1990.
- [5] NATHANSON F E, REILLY J P, COHEN M N. Radar Design Principles: Signal Processing and the Environment[M]. Second Edition. America: SciTech Publishing, Inc, 1999.
- [6] CORPORATION T S. Section 5.6.1: Backscatter from Sea[M]. Radar Workstation, 1990.
- [7] CHAN H C. Radar Sea-clutter at Low Grazing Angles[J]. IEE Proceedings F Radar and Signal Processing, 1990, 137(2): 102–112.
- [8] DALEY J C, RANSONE J T, BURKETT J A, et al. Seaclutter Measurements on Four Frequencies[R]. Washington DC: Naval Research Lab, 1973.
- [9] DALEY J C. Radar Sea Return-JOSS II[R]. Washington DC: Naval Research Lab, 1973.
- [10] BAKKER R, CURRIE B. The McMaster IPIX Radar Sea Clutter Database[EB/OL]. http://soma.crl.mcmaster.ca/ ipix
- [11] 尹志盈,张玉石,高波.雷达杂波测量现状及发展趋势[J].制导与引信,2009,30(2):16—19.
- [12] LI Y Z, WEST J C. Low-Grazing-Angle Scattering from 3-D Breaking Water Wave Crests[J]. IEEE Trans. Geosci Remote Sens, 2006, 44(8): 2093—2101.
- [13] YANG W, ZHAO Z Q, QI C H, et al. Electromagnetic Modeling of Breaking Waves at Low Grazing Angles with Adaptive Higher Order Hierarchical Legendre Basis Functions[J]. IEEE Trans. Geosci Remote Sens, 2011, 49 (1): 346–352.
- [14] MCDANIEL S T. Microwave Backscatter from Nongaussian Seas[J]. IEEE Trans. Geosci Remote Sens, 2003, 41(1): 52–58.
- [15] WARD K D, BAKER C J, WATTS S. Maritime Surveillance Radar Part I: Radar Scattering from the Ocean Surface[J]. IEE Proceedings Part F: Radar Signal Process, 1990, 137(2): 51—62.
- [16] HORST M M, DYER F B, TULEY M T. Radar Sea Clut-

ter Model[C]// International Conference on Antennas and Propagation, London, 1978: 6-10.

- [17] FLETCHER C. Clutter subroutine[R]. Technology Service Corporation, 1978.
- [18] REILLY J P, DOCKERY G D. Influence of Evaporation Ducts on Radar Sea Return[J]. IEE Proceedings F Radar and Signal Processing, 1990, 137(2): 80–88.
- [19] SITTROP H. On the Sea-clutter Dependency on Windspeed[C]// IEE Conference of Radar. London, 1977: 110—114.
- [20] GREGERS-HANSEN V, MITAL R. An Improved Empirical Model for Radar Sea Clutter Reflectivity[R]. Washington DC: Naval Research Laboratory, 2012.
- [21] GREGERS-HANSEN V, MITAL R. An Empirical Sea Clutter Model for Low Grazing Angles[C]// IEEE International Radar Conference. Washington DC, 2009.
- [22] ULABY F T, MOORE R K, FUNG A K. Microwave Remote Sensing Vol. II: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory[M]. Massachusetts: Addison-Wesley, 1982.
- [23] MORCHIN W C. Airborne Early Warning Radar[M]. Boston London: Artech House, 1990.
- [24] ZHANG Y S, ZHANG J P, LI X, et al. Modified GIT Model for Predicting Wind-speed Behaviour of Low-Grazing-Angle Radar Sea Clutter[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(10): 108402.
- [25] FAY F A, CLARKE J, PETERS R S. Weibull Distribution Applied to Sea Clutter[C]// IEE Conference of Radar. London, 1977: 101—103.
- [26] JAKEMAN E, PUSEY P N. A Model for Non-rayleigh Sea Echo[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1976, 24(6): 806—814.
- [27] DONG Y H. Distribution of X-Band High Resolution and High Grazing Angle Sea Clutter[R]. Edinburgh South Australia: Defence Science and Technology Organisation, 2006.
- [28] 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.
- [29] DONG Y H. Distribution of X-Band High Resolution and High Grazing Angle Sea Clutter[R]. Edinburgh South Australia: Defence Science and Technology Organisation, 2006.
- [30] HOSKING J R M, WALLIS J R. Parameter and Quantile Estimation for the Generalized Pareto Distribution[J]. Technometrics, 1987, 29(3): 339–349.
- [31] HAO D, YONG H, BO LIU N, et al. Modeling of Sea Spike Events with Generalized Extreme Value Distribution[C]// European Radar Conf. Paris, France, 2015: 113—116.
- [32] ANASTASSOPOULOS V, LAMPROPOULOS G A, DROSOPOULOS A, et al. High Resolution Radar Clutter Statistics[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(1): 43—60.

- [33] ANASTASSOPOULOS V, LAMPROPOULOS G A. High Resolution Radar Clutter Classification[C]// Radar Conference 1995. Record of the IEEE 1995 International, 1995: 662—667.
- [34] ANASTASSOPOULOS V, LAMPROPOULOS G A. A Generalized Compound Model for Radar Clutter[C]// IEEE National Radar Conference. Atlanta, 1994: 41–45.
- [35] ANASTASSOPOULOS V, LAMPROPOULOS G A, REY M. A New Clutter Model for SAR Images[C]// Proceedings of International Conference on Applications of Photonic Technology. Toronto, 1994.
- [36] FARSHCHIAN M, POSNER F L. The Pareto Distribution for Low Grazing Angle and High Resolution X-band Sea Clutter[C]// IEEE Radar Conference. Washington DC, 2010: 789—793.
- [37] LOMBARDO P, GRECO H, GINI F, et al. Impact of Clutter Spectra on Radar Performance Prediction[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(3): 1022–1038.
- [38] LEE P H Y, BARTER J D, BEACH K L, et al. Power Spectral Lineshapes of Microwave Radiation Backscattered from Sea Surfaces at Small Grazing Angles[J]. IEE Proceedings-Radar Sonar and Navigation, 1995, 142(5): 252–258.
- [39] WALKER D. Experimentally Motivated Model for Low Grazing Angle Radar Doppler Spectra of the Sea Surface[J]. IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation, 2000, 147(3): 114—120.
- [40] WALKER D. Doppler Modeling of Radar Sea Clutter[J]. IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation, 2001, 148(2): 73—80.
- [41] MILLER R J. Variability in Spectra of Low-grazing Angle Sea Clutter Returns[C]// Proceedings of SET Sympo-

sium on Low Grazing Angle Clutter. Maryland, 2000.

- [42] MILLER R J, DAWBER W N. Analysis of Spectrum Variability in Sea Clutter[C]// International Radar Conference. 2002: 444—448.
- [43] WARD K D, TOUGH R J A, WATTS S. Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance[M].
 2nd Edition. London: The Institution of Engineering and Technology, 2013.
- [44] WARD K D, TOUGH R J A, WATTS S. Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance [M]. London: The Institution for Engineering and Technology, 2006: 452.
- [45] 张玉石.小擦地角海杂波测量与建模方法研究[D].西 安:西安电子科技大学,2014.
- [46] ANTIPOV I. Simulation of Sea Clutter Returns[R]. Salisbury: Defence Science and Technology Organisation, 1998.
- [47] WATTS S. Cell-averaging CFAR Gain in Spatially Correlated K-distributed Clutter[J]. IEE Proceedings Radar Sonar and Navigation, 1996, 143(5): 321—327.
- [48] DING H, GUAN J, LIU N, et al. New Spatial Correlation Models for Sea Clutter[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(9): 1833–1837.
- [49] DONGHUE J, DOCKERY G D. Improved Charaterization of Low Grazing Angle Sea Clutter by the Parabolic Equation Method, RTO-MP-60[R/OL]. [2000-10-01]. http://airex.tk-sc.jaxa.jp /pl/dr/20010009829/en.
- [50] WATTS S, ROSENBERG L. A Review of High Grazing Angle Sea Clutter[C]// International Conference on Radar. 2013: 240—245.
- [51] SIMON W. Sea Clutter: Recent Progress and Future Challenges[C]// IEE Radar conference. 2008: 10–16.