



target
(high speed vessel)

targets
(buoys)

target
(high speed vessel)
targets
(buoys)

▶ 目标探测与识别技术丛书

海杂波：

散射、K分布和雷达性能（第二版）

Sea Clutter: Scattering, the K Distribution
and Radar Performance, 2nd Edition

◎ [英] Keith Ward, Robert Tough, Simon Watts 著

◎ 鉴福升 李洁 陈图强 罗丰译

◎ 罗军 主审

目标探测与识别技术丛书

海杂波： 散射、K分布和雷达性能 (第二版)

Sea Clutter: Scattering, the K Distribution
and Radar Performance

2nd Edition

[英] Keith Ward Robert Tough Simon Watts 著

鉴福升 李 洁 陈图强 罗 丰 译

罗 军 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

该书是《海杂波：散射、K分布和雷达性能》的第二版，书中对我们目前了解的雷达海杂波给出了权威解释。其涵盖的主题包括雷达海杂波的特性，海洋表面雷达散射建模，海杂波的统计模型，海杂波及其他的随机过程模拟，对海面小目标检测、成像雷达探测海洋表面特征、性能计算、CFAR检测，以及雷达规格和雷达的性能测量。书中对实际雷达系统的性能计算给出了足够的细节，使读者能够有信心地解决相关问题。

本书在第一版基础上进行了全面的修订和更新，增加的新内容主要包括：海杂波多普勒特性和相关的检测处理方法、双基地海杂波测量；濒海海杂波和双基地海杂波的电磁散射理论；对数正态分布、威布尔分布模型在雷达性能预测方面的应用；不同条件下K分布形状参数的模拟；海杂波多普勒谱的仿真；高入射余角情况下的散射；K分布在其他领域中的应用等。

本书可作为电子工程及相关专业的研究生参考教材，也可作为雷达专业工程技术人员的参考用书。

Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance, 2nd Edition

ISBN: 978-1-84919-589-8

Original English Language Edition published by the IET, Copyright 2013, All Rights Reserved

版权贸易合同登记号 图字：01-2013-7393

图书在版编目(CIP)数据

海杂波：散射、K分布和雷达性能：第二版/(英)基思·沃德(Keith Ward)，(英)罗伯特·塔弗(Robert Tough)，(英)西蒙·瓦特(Simon Watts)著；鉴福升等译。—北京：电子工业出版社，2016.9

(目标探测与识别技术丛书)

书名原文：Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance, 2nd Edition

ISBN 978-7-121-29838-7

I. ①海… II. ①基… ②罗… ③西… ④鉴… III. ①海洋-雷达杂波 IV. ①TN951

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第208279号

策划编辑：刘海艳

责任编辑：周宏敏

印 刷：北京京科印刷有限公司

装 订：北京京科印刷有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：25.5 字数：670千字

版 次：2016年9月第1版(原著第2版)

印 次：2016年9月第1次印刷

定 价：88.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010)88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：lhy@phei.com.cn。

翻译组名单

组 长：鉴福升

副组长：李 洁 陈图强 罗 丰

成 员：李庶中 曾 浩 张 杨 李越强 张华伟

徐 勇 范一飞 柯 斌 皇甫一江

主 审：罗 军

作者简介

Keith Ward 教授在其整个职业生涯中，一直从事雷达和军事系统工作，主要致力于在役雷达和远程遥感的研究。他是伦敦大学学院(UCL)电子与电气工程学院的客座教授。

Robert Tough 博士在海面小目标成像、粗糙海表面散射、检测理论和距离像分类方面开展了广泛的研究，主要服务于美国和英国的一些客户。

Simon Watts 教授服务于英国泰勒斯公司，也是伦敦大学学院(UCL)电子与电气工程学院的客座教授。他的研究范围集中在海杂波和信号检测方法方面。

译 者 序

海洋面积约占全球面积的 3/4, 能够准确地检测识别海面上的目标对国家的军事国防具有重要意义。当雷达探测位于海面上的目标时, 海表面对雷达发射信号的后向散射常常严重干扰雷达对目标的检测, 这些干扰一般被称为海杂波。由于海面受天气状况、浪涌、风速等多种自然因素的影响, 随时间演进动态变化, 而其后向散射特性随雷达参数、观测角度和气象条件的不同会发生很大变化, 因此, 对海杂波的研究一直是一个颇具挑战性的工作。

随着我国海洋强国战略的推进, 海用雷达的发展不断加速, 海杂波信号的研究也越来越受到人们的重视。无论是雷达设计师、海杂波技术和理论研究人员, 还是相关专业研究生, 都希望有一本系统全面介绍海杂波的专著, 系统学习海杂波散射特性基本知识、海杂波信号检测和物理建模等技术理论。该书可完全满足读者的这种需求。

本书是一本系统全面介绍海杂波的专著。作者 Keith Ward 教授、Robert Tough 博士、Simon Watts 教授在雷达系统、海面目标检测理论和成像、海杂波与信号检测等方面均有深入广泛的研究, 本书是他们关于海杂波的多年研究成果的集中体现。为了推动我国海用雷达目标检测、跟踪、识别技术的发展, 我们组织翻译了本书。全书共分 4 个部分 17 章, 涵盖了海杂波特性、K 分布的数学分析、雷达检测和物理建模, 内容十分丰富, 是目前该领域内最为完备的著述。

本书无论对于雷达工程师还是研究生、学者或是专业研究开发人员都是重要的参考资料。

本书的翻译工作由鉴福升牵头完成, 参与本书初译的还有李洁、陈图强、罗丰、李庶中、曾浩、张杨、李越强、张华伟、柯斌、皇甫一江、徐勇、范一飞等同志, 最后由罗军完成审校。

我们在翻译过程中力求忠实、准确地把握原著, 同时保留原著的风格。但由于本书涉及知识面很宽, 译者知识结构和学识水平有限, 对于原著的理解和翻译难免会有不足之处, 恳请读者批评指正!

致 谢

书中所述内容主要是在过去 30 年中的一些研究工作，这些工作主要来自英国国防部的资助，也有来自作者自己服务的英国泰勒斯公司 (Thales UK) 和智能雷达公司 (Igence Radar) 提供的资金支持。作者非常感谢他们的支持，非常感谢来自英国和其他国家的研究者对这本书所做的贡献。

符 号 表

符 号	意 义	章 节 号
$\langle \rangle_N$	N 次试验均值	5.2
$\langle \rangle$	期望	2.4
∇	梯度	15.3
α	负二项分布参数	5.3
α	门限系数(相对均值)	3.5.6
α	序贯检验中类型 1 错误的概率(卖方风险)	14.5
$\hat{\alpha}$	门限系数的估计	13.3
β	威布尔形状参数	3.5.2
β	序贯检验中类型 2 错误的概率(买方风险)	14.5
β	双基地角	2.11
$\beta(t)$	波生长的松弛率	15.4
$\Gamma(\cdot)$	伽马函数	2.4
$\Gamma(v, t)$	不完全伽马函数	12.3
γ	相关函数 a_2 曲率的量测	7.3
γ	欧拉常数	13.2
Δ	多普勒谱的半功率宽度	3.8
Δf	频率步长(频率捷变)	2.5
ε	介电常数或相对介电常数	15.3
ε_0	真空介电常数	15.3
ζ	Hermitian 积的幅度	8.4
$\zeta(\mathbf{x})$	海表面法向梯度	16.3
η	海表面高度	15.2
η_L, η_S	长波、短波分量的海表面高度	16.2
θ	信号相位	6.2
θ_1, θ_2	双基地几何关系中的入射角和散射角	2.11
θ_{az}	天线方位波束宽度	12.2
θ	方位角	12.2
θ_{sw}	涌浪方向	3.5
θ_{gr}	入射余角	16.5
θ_i	入射角	16.2
θ_{loc}	本地入射角	16.2
θ_w	风向	15.2
λ	序贯检验中的判别比	14.5
λ	雷达波长	3.2.2
Λ	似然比	10.3
Λ_2	随机场相关函数的导数矩阵	11.6
μ	相对磁导率	15.3
μ_0	真空磁导率	15.3
μ	脉间积累后 K 分布强度	12.3

符 号	意 义	章 节 号
μ	像素的均值向量	11.2
ν_{eff}	有效的 K 分布形状参数	7.3
ν	伽马分布和 K 分布形状参数	3.5.3
$\hat{\nu}$	K 分布形状参数的估计	13.3
ξ	两个复信号的 Hermitian 积	8.4
ρ	电荷密度	15.3
ρ	表面粗糙度参数	16.5
ρ	距离分辨长度(距离分辨率)	12.2
ρ	PDF 起伏指数	3.5
ρ	KA 分布中归一化的平均尖峰强度	3.5
ρ	KK 分布中归一化的平均尖峰强度	3.7
ρ_l	长波分量的相关函数	16.2
ρ_j	滞后的距离相关系数	2.10
ρ_w	水密度	15.2
σ	雷达截面积和散射功率	16.3
σ	形状参数的对数正态 PDF	3.5
$\sigma^0, \sigma_{HH}^0, \sigma_{VV}^0$	VV 和 HH 极化时的面反射系数(归一化杂波 RCS)	2.1
σ_{BW}	K 加尖峰模型中, Bragg/白浪平均强度	3.5.6
σ_h	波高均方根	15.2
σ_s	谱宽标准差	3.8
σ_{sp}	K 加尖峰模型中, 尖峰强度均值	3.5.6
σ_B^0	归一化的双基地杂波 RCS	3.4
$\sigma_a^0, \sigma_d^0, \sigma_c^0$	逆风、顺风、侧风时, 归一化杂波 RCS	3.3
$\hat{\sigma}_1$	参数估计	10.6
τ	脉冲宽度	14.5
ϕ	仰角观察方向	12.2
ϕ	长波表面倾斜	16.2
ϕ	单一散射体的相位	6.2
ϕ	双基地方位角	2.11
ϕ_{el}	天线方位波束宽度	12.2
ϕ_{gr}	入射余角	12.2
$\phi(t)$	波谱密度	15.4
χ	用于检测或图像增强判别	10.8
ψ	满足 Helmholtz 方程的标量场	16.3
ψ	天线俯角	12.2
$\psi(z)$	双伽马函数	10.9
w	时间频率	2.10
Ω	波龄	15.2
A	散射表面积	15.3
A_c	雷达分辨单元	3.5
a	威布尔尺度参数	3.5.2
\mathbf{A}, A_I, A_Q	同相和正交分量的相干信号	6.2
a, b	对数放大器参数	13.2
ACF	自相关函数	2.10

续表

符 号	意 义	章 节 号
AGC	自动增益控制	14.2
a_j	单元平均加权	13.2
\mathbf{a}_n	独立散射体对场 E 的贡献	6.2
ASuW	反水面战	1.2
ASW	反潜战	1.2
a_z	水表面的垂直加速度	7.3
$B_\eta(q)$	波高饱和谱	15.2
\mathbf{B}	磁感应强度	15.3
B	脉冲带宽和接收机噪声带宽	2.5
b	Phillips 常数	15.2
b	伽马和 K 分布的尺度参数	3.5.3
BAM	破碎面模型	16.5
c	海浪相位速度	15.2
$C(\mathbf{U})$ or $C(k)$	特征函数	6.2
CA CFAR	单元平均恒虚警	13.2
CFAR	恒虚警率	1.5
CNR	杂波噪声比	12.4
\mathbf{D}	电位移	15.3
E	幅度	2.4
\mathbf{E}	电场向量	2.7
EI, EQ	同向和正交分量	6.2
EM	电磁场	1.5
$\langle E^n \rangle_{Rice}$	莱斯分布的第 n 阶矩	10.7
$\text{erf}()$	误差函数	6.2
$\text{erfc}()$	互补误差函数	4.6
ERSI	遥感 SAR 卫星	1.2
ESA	欧洲航天局	1.2
E_T	场强门限	6.2
\mathbf{e}_z	垂直向单位向量	16.2
${}_2F_1, {}_1F_1$	式(9.15)和式(9.16)定义的超几何和汇合型超几何级数	9.2
f	雷达工作频率	2.5
$F(x)$	累积分布函数或概率分布	11.6
FFT	快速傅里叶变换	2.8
F_n	接收机噪声系数	12.2
f_r	脉冲重复频率	3.8
$G(\theta, \phi)$	单向天线增益	12.2
g	重力加速度	2.10
G	CA CFAR 中, CA 单元与被测单元的间隔个数	13.2
$G()$	格林函数	15.3
$G()$	功率谱密度	3.8
\bar{G}	格林函数梯度的法向量	17.7
g_{nm}, g_{vv}	散射 RCS 的莱斯和复合模型中的项	16.2
g_n	高斯不相关的随机变量	4.3
H, HH	水平极化	2.3

符 号	意 义	章 节 号
\mathbf{H}	磁场矢量	2.7
h	雷达距离地球表面的高度	12.2
h_m	平均浪高	3.2
$H_0^{(1)}(z)$	零阶 Hankel 函数	16.3
H_0	序贯检验中的空假设	14.5
H_1	序贯检验中的备择假设	14.5
$h_{1/3}$	有效浪高	2.2
H_n	Hermite 多项式	4.6
$\Im(\cdot)$	散射公式积分	16.3
I_n	第一类(修正)贝塞尔函数, 阶数 n	6.2
$i_n(z), k_n(z)$	修正的球贝塞尔函数	11.4
\mathbf{j}	电流矢量	15.3
J_n	第一类(未修正)贝塞尔函数, 阶数 n	9.4
k	目标起伏参数	12.4
k	玻尔兹曼常数	12.2
\mathbf{k}	波矢	15.3
k	空间频率或波数	2.10
k	复高斯过程的相关度	11.4
k	有序统计排序	13.2
k	KK 分布参数	3.6
\mathbf{K}	SAR 像素的协方差阵	11.2
\mathbf{k}_H	后向散射波矢量的水平分量	16.2
k_m	最慢波的波数	15.2
K_r	第二类修正的贝塞尔函数(虚宗量 Hankel 函数)	3.5.3
k_{pol}	极化参数	3.5
k_z	后向散射波矢的垂直分量	16.2
L_s	散射面积计算中的表面长度	16.3
L	FFT 长度	3.8.2
L_n^a	涉及的拉盖尔多项式	4.7
L_μ	雷达微波损失	14.5
L, LL	左手极化	2.7
L_a	大气和传输损失	12.2
LGA	低入射余角	16.1
L_n	拉盖尔多项式	4.7
L_{PM}	Pierson - Moskowitz 饱和谱	15.2
l_x	散射面横向范围	16.4
\hat{m}	强度均值的估计	2.10
M	MTF 值	16.6
\bar{M}	CA CFAR 中的平均单元数量	13.2
m	取大 CFAR 的最大值	13.2
m	对数正态分布尺度参数	3.5
m_s	谱宽均值	3.8
$m_f(\cdot)$	谱的平均多普勒频率	3.8
m_0	序贯检验的理想值	14.5

符 号	意 义	章 节 号
m_1	序贯检验中最大可接受值	14.5
MFR	多功能雷达	1.2
m_n	第 n 阶矩	7.3
MTF	调制转换函数	16.6
\mathbf{n}	表面法向矢量	15.3
n	扫描次数	14.5
\bar{n}	脉冲数	3.5
\bar{N}	脉冲积累数	13.2
N	离散事件(试验)数	5.2
\bar{N}	符合泊松和负二项分布的平均数量	7.3
\bar{N}	尖峰平均数量	3.5
N_{eff}	独立采样的有效数	14.3
Norm(\mathbf{K})	矩阵 \mathbf{K} 的归一化积分	5.6
NBRCS	归一化的双基 RCS	2.11
ρ	Wishart 分布模型中的随机变量数	11.3
ρ	事件概率	13.3
$P(E_1 E_2)$	条件 PDF	6.2
$P(n N)$	投掷 N 次出现 n 次正面的概率	5.3
$P(x)$	概率密度函数	6.2
\hat{p}	一个事件的概率估计	13.3
p_e	平均杂波功率	12.2
$P_e(x)$	杂波本地功率的 pdf	3.5.3
P_D	检测概率	6.2
P_{FA}	虚警概率	6.2
p_n	噪声功率	3.5.4
PPI	平面位置显示器	14.2
p_r	雷达接收功率	12.2
p_s	信号平均功率	12.2
p_t	峰值发射功率	12.2
q	波数(变量)	15.2
\mathbf{Q}	\mathbf{K} 阵 Cholesky 分解的上三角矩阵	11.2
q_{cut}	分离长波和短波的波数	16.2
Q_{dist}	互补的分位数函数	4.6
R	菲涅尔反射系数	17.3
R	目标距离	12.2
\mathbf{r}, \mathbf{r}'	散射表面以上的点	15.3
\mathbf{R}, \mathbf{RR}	右旋极化	2.7
RAF	皇家空军	1.2
RCS	雷达截面积	2.1
r_e	雷达地球半径	12.2
$R_G(t)$	高斯随机变量的相关系数	4.6
R_j 或 $R(j)$	距离自相关系数, 间距 j	2.10
RN	皇家海军	1.2
s	BAM 模型中的破碎波面积	7.3

续表

符 号	意 义	章 节 号
s	尖峰强度	3.5
s	谱宽	3.8
S_{η}	海表面高度功率谱	15.2
SAR	合成孔径雷达	1.2
SCR	信杂比	12.4
SIR	信干比	12.4
SNR	信噪比	13.2
$S(w)$	海杂波多普勒功率谱	6.4
S_s, S_L	短波和长波波谱	16.2
STC	灵敏度时间控制	14.2
T_0	标准噪声温度	12.2
t	检测门限	13.2
T	试验统计	13.3
T	表面张力	15.2
t_a	虚警平均间隔时间	14.3
t_d	平均虚警时长	14.3
$\text{Tr}(\mathbf{A})$	矩阵 A 的迹	11.3
U	水流	15.4
U	威布尔形状参数对数估计器	13.3
U	风速	3.2
u^*	风摩擦速度	15.2
U_{10}	风速(海面以上 10m 处)	15.2
V, VV	垂直极化	2.3
\mathbf{v}	散射表面的 $x-y$ 平面上一点	15.3
$\text{var}(\cdot)$	方差	13.3
VH, HV, RL, LR	交叉极化	2.7
x	平均杂波强度	2.4
\bar{X}	无量纲取值	15.2
\mathbf{x}, \mathbf{x}'	散射表面上的点	15.3
$ x $	变量或参数集合	10.5
x_n	相关随机变量	4.3
Y	门限	12.3
y	对数转换强度	13.2
Y_n	第二类贝塞尔函数, 阶数 n	17.2
z	杂波强度	2.4

目 录

第1章 绪论	1
1.1 前言	1
1.2 海用雷达	1
1.3 海面雷达回波的建模	4
1.4 杂波模型在雷达研发中的使用	5
1.4.1 需求定义	6
1.4.2 潜在性能建模	6
1.4.3 系统和算法开发	6
1.4.4 性能评估和验收试验	6
1.4.5 服役期的策略和训练	6
1.4.6 服役期的升级	7
1.5 本书大纲	7
参考文献	9

第 一 部 分

第2章 雷达海杂波特征	12
2.1 概述	12
2.2 海表面	13
2.3 海杂波反射系数	14
2.4 幅度统计特性	16
2.4.1 海杂波幅度统计特性的复合特征	17
2.5 频率捷变与海杂波	19
2.6 幅度分布的观测	19
2.7 极化特性	21
2.8 杂波尖峰与调制	24
2.9 雷达海杂波的相干特性	29
2.10 空间特性	32
2.10.1 距离自相关函数(ACF)	32
2.10.2 距离-时间强度图的功率谱分析	34
2.11 双基地杂波	36
2.11.1 双基地散射几何关系	36
2.11.2 双基地反射系数 NBRCS	37
2.11.3 双基地幅度统计特性	38
2.11.4 双基地多普勒谱	38

参考文献	38
第3章 海杂波的经验模型	41
3.1 概述	41
3.2 低入射余角下归一化海杂波 RCS 模型	41
3.2.1 RRE 模型	41
3.2.2 GIT 模型	43
3.2.3 Sittrop 模型	44
3.2.4 TSC 模型	45
3.2.5 混合模型	45
3.2.6 其他结论	46
3.3 中、高入射余角归一化 RCS 模型	47
3.4 双基归一化 RCS 模型	50
3.4.1 面内 NBRCS 模型	50
3.4.2 面外 NBRCS	52
3.5 低入射余角统计特性	53
3.5.1 对数正态分布	53
3.5.2 威布尔分布	53
3.5.3 复合 K 分布	54
3.5.4 复合 K 分布加噪声	55
3.5.5 低入射余角下的形状参数	56
3.5.6 离散尖峰建模	59
3.6 中等入射余角统计特性	62
3.7 双基地幅度统计特性	65
3.8 多普勒频谱	66
3.8.1 平均多普勒频谱	66
3.8.2 多普勒频谱随时间的变化	67
3.8.3 双基多普勒频谱	72
参考文献	72
第4章 杂波和其他随机过程的仿真	75
4.1 引言	75
4.2 根据指定的概率密度函数生成不相关随机数	75
4.3 相关高斯过程的产生	76
4.4 随机过程的傅里叶合成	79
4.5 生成相关伽马分布随机数的近似方法	80
4.6 MNLT 产生的非高斯过程的相关特性	81
4.7 相关指数和威布尔过程	82
4.8 通过 MNLT 产生相关伽马过程	85
4.9 相干杂波仿真	88

4.9.1 杂波谱仿真	89
4.9.2 时间序列数据的仿真	92
4.9.3 讨论	94
参考文献	95

第二部分

第5章 概率论基础	98
5.1 概述	98
5.2 有限离散事件	98
5.3 无限离散事件	100
5.4 连续随机变量	101
5.5 随机变量的函数	104
5.6 正态分布	106
5.7 随机过程	111
5.8 功率谱和相关函数	112
5.9 复高斯过程	113
5.10 空间相关过程	115
5.11 随机微分方程和噪声过程	116
5.12 其他成果	121
5.12.1 噪声效应的矩修正	121
5.12.2 有限样本的矩修正	122
5.12.3 顺序统计	123
5.12.4 序贯检验	124
参考文献	126
第6章 高斯和非高斯杂波模型	127
6.1 引言	127
6.2 高斯杂波模型	127
6.3 非高斯杂波	130
6.3.1 非高斯杂波的复合模型	131
6.3.2 局部功率的伽马分布和 K 分布	132
6.3.3 K 分布杂波中的相干信号	133
6.3.4 有加性噪声的 K 分布杂波	133
6.3.5 零差相位及一般 K 分布	134
6.4 相干杂波建模	135
参考文献	139
第7章 随机游走模型	140
7.1 引言	140
7.2 非高斯散射的随机游走模型	140

7.3	A 类和破碎面模型	143
7.4	K 分布噪声的福克尔-普朗克描述	147
7.5	结论	152
	参考文献	152
第 8 章	K 分布的扩展	153
8.1	前言	153
8.2	零差和广义 K 模型	153
8.3	耦合站点的群和连续极限	159
8.4	一些应用	162
8.5	小结	163
	参考文献	164
第 9 章	与 K 分布有关的特殊函数	165
9.1	前言	165
9.2	伽马函数及相关问题	165
9.3	K 分布概率密度函数的一些性质	168
9.4	贝塞尔函数 I_n 和 J_n	172
9.5	Hermite 和拉盖尔多项式展开	175
	参考文献	177

第三部分

第 10 章	海杂波中小目标的检测	180
10.1	引言	180
10.2	检测和虚警概率的统计模型	180
10.3	似然比与最优检测	181
10.4	一些简单的性能计算	182
10.5	广义似然比方法	185
10.6	一个简单高斯例子	187
10.6.1	一个简单的基于似然比的方法	187
10.6.2	基于广义似然比的方法	188
10.7	瑞利杂波中稳定信号的检测	190
10.7.1	基于广义似然比的方法	190
10.7.2	间隔内峰值检测	193
10.8	相参检测中的应用	195
10.9	杂波参数估计	196
10.9.1	伽马和威布尔参数的最大似然估计器	196
10.9.2	易处理但次优的 K 和威布尔参数估计器	197
10.10	非高斯杂波复合形式的含义	198
10.10.1	改进的基于广义似然比的检测	199