

doi: 10.7690/bgzdh.2019.09.015

基于实测数据的海杂波建模方法

刘宇, 顾振杰, 韩红斌

(中国人民解放军 91336 部队, 河北 秦皇岛 066000)

摘要: 为解决海杂波模型过于简单、逼真度不高及杂波模拟缺乏针对性等问题, 提出一种基于实测数据的海杂波建模方法。在分析经典海杂波统计模型基础上, 利用导引头采集不同海况下的实测数据, 采用拟合度检验及参数估计的方法, 结合 SIRP 法模拟生成仿真杂波数据, 通过对经典统计模型进行修正, 得到实用的海杂模型。仿真结果表明, 该方法对于提高射频仿真系统中海杂波模型逼真度及置信度具有参考价值。

关键词: 海杂波建模; 实测数据建模; 海杂波经典统计模型

中图分类号: TP302 **文献标志码:** A

Sea Clutter Modeling Method Based on Measured Data

Liu Yu, Gu Zhenjie, Han Hongbin

(No. 91336 Unit of PLA, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: In order to solve the problems of sea clutter modeling such as simplicity, low fidelity, and lack of pertinence, a sea clutter modeling method based on measured data is proposed. Based on the analysis of the classical sea clutter statistical model, the seeker is used to collect the measured data under different sea conditions, and the simulation clutter data are generated by fitting test and parameter estimation and combined with SIRP method. The practical sea clutter model is obtained by modifying the classical statistical model. The simulation results show that this method has reference value for improving the fidelity and confidence of sea clutter model in radio frequency simulation system.

Keywords: sea clutter modeling; measured data modeling; sea clutter classical statistical model

0 引言

海杂波模拟是射频仿真系统中一项重要研究内容。早在 20 世纪第二次世界大战期间, 国外学者就开始了海杂波特性的研究和试验测定。目前, 雷达海杂波的理论研究已经逐渐深入, 特别是在海杂波的统计特性研究方面有了长足的进步^[1-4]。

目前, 在射频仿真试验中海杂波模型主要采用经典统计模型。这些模型过于简单、逼真度不高、不能准确反映特定导引头在不同频率点及不同海况下海杂波的特性。笔者针对这些问题, 通过雷达导引头采集不同海况下海杂波实测数据, 利用数据分析、拟合度检验及杂波参数估计等方法, 对经典统计模型进行修正, 进而构建出高置信度海杂波模型。该方法可为导弹制导系统抗杂波仿真试验及战法推演提供模型支撑。

1 海杂波经典统计模型

通常用来描述海杂波幅度分布的经典杂波模型主要包括: 瑞利分布、对数正态分布、韦布尔分布、K 分布等^[5-11]。

1.1 瑞利分布模型

在杂波幅度统计分布模型中, 瑞利分布是最为流行且最早被采用的模型。它假设散射单元由大量统计独立的小散射体组成, 而且没有散射体占主导时, 其合成杂波的统计特性与热噪声一致, 即当在一个杂波单元内含有大量相互独立、没有明显贡献的散射源时, 包络可用瑞利分布来描述。其概率密度函数如下式所示:

$$p(x) = \begin{cases} (x/\sigma^2) \exp(-x^2/2\sigma^2), & x \geq 0. \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

1.2 对数正态分布模型

对数正态分布是较早提出的一类非瑞利杂波模型, 具有 2 个控制参数, 能够比瑞利分布更好地拟合测量数据, 但有时会出现拖尾过拟合的现象。在雷达鉴别力提高或者在高海情下, 海杂波的拖尾较长, 后向散射特性偏离瑞利分布, 比较符合对数正态分布, 其概率密度函数的表达式如下:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2 x}} \exp\left[-(\ln x - \mu)^2 / 2\sigma^2\right]$$

收稿日期: 2019-04-29; 修回日期: 2019-05-23

作者简介: 刘宇(1979—), 男, 湖北人, 硕士, 工程师, 从事射频仿真研究。E-mail: Liuyu12592@163.com。

1.3 韦布尔分布模型

Weibull 模型能很好地模拟海杂波，能在更广的范围内精确表示实际的杂波分布。通常，在分析低入射角高分辨力雷达回波的情况下，海浪杂波能够用 Weibull 分布模型精确地描述。其概率密度函数的表达式如下：

$$f(x) = \frac{p}{q} \left(\frac{p}{q}\right)^{p-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{q}\right)^p\right]$$

1.4 K 分布模型

分布模型是一种构造的复合分布统计模型，由慢速变化的纹理分量调制快速变化的斑纹分量构成，适合描述多种高分辨低擦地角的海杂波和地杂波。它不仅能够很好地满足所观察杂波的幅值特性，而且还便于描述杂波的脉间相关性能，是目前能够较准确反映雷达海杂波的模型。其概率密度函数的表达式如下：

$$f(y) = \frac{2d^{2v}y^{2v-1}}{\Gamma(v)} \exp(-d^2y^2)$$

2 基于实测数据海杂建模方法

笔者在经典杂波模型基础上，提出了一种利用实测数据对经典统计模型进行拟合、估计及修正建模方法如图 1 所示。首先，利用导引头采集不同海况下的杂波数据，并将采集的原始数据整理入库；其次，利用采集的杂波数据对经典统计模型进行拟合优度检验，通过 MSD 检验判别哪一种分布与杂波模型拟合得最好，并且采用矩估计法对最优拟合分布模型进行参数估计；最后，采用 SIRP 法模拟生成仿真杂波数据，并检验其与原始数据分布的一致性。

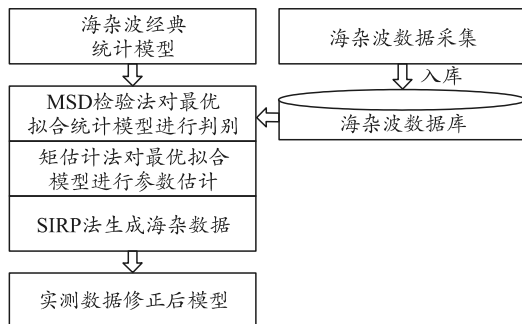


图 1 海杂波实测数据建模方法

3 基于实测数据海杂建模过程及仿真实例

3.1 数据采集及入库

海杂波录取系统主要由雷达导引头、控制设备、

数据录取处理设备 3 部分组成。系统组成如图 2。

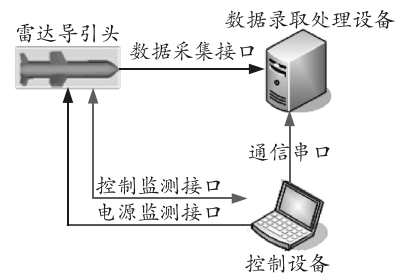


图 2 海杂波录取系统组成

海杂波录取系统中导引头主要用于向海面发射雷达信号，并接收其反射的杂波信号。控制设备主要用于对导引头进行控制和参数装订，控制导引头及各子系统工作。数据录取处理设备主要用于采集和存储雷达回波信号。

海杂波数据采集方案如图 3 所示。将导引头架设于塔楼，利用控制设备调整导引头天线俯仰角，使相参导引头发射信号波束与海面形成一定夹角。将导引头对准要采集数据的海面，利用控制设备设定导引头天线扫描的方位角和距离，记录采集过程中的雷达参数、海况、雷达工作环境等关键信息，并按设定参数进行采样，将采集的数据存储在数据录取处理设备中。图 4 为采集到海杂波原始数据。

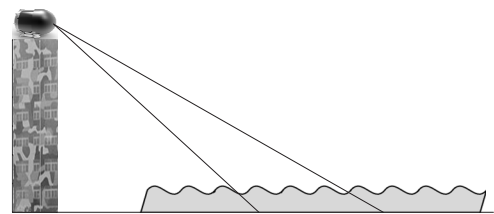


图 3 海杂波数据采集

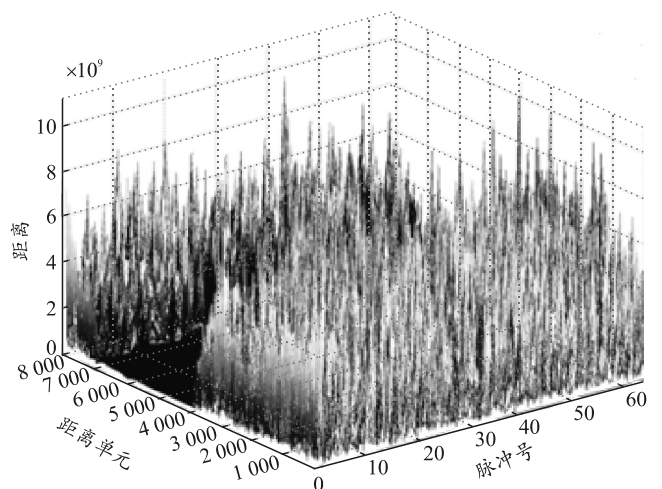


图 4 海杂波原始数据

将采集的海杂波原始数据及相关信息录入杂波数据库，便于以后分析建模。数据库主要记录的信息包括：数据采集信息、数据管理信息、数据文件

信息、雷达参数信息、海况信息、雷达工作环境信息等。海杂波数据库如图 5 所示。



图 5 海杂波数据库管理系统

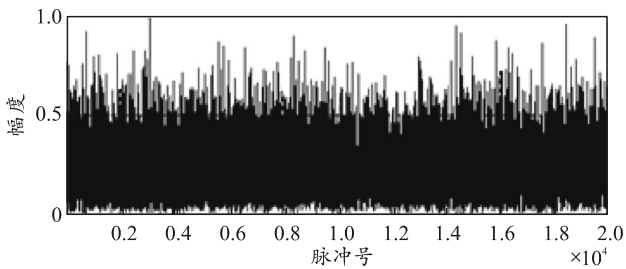
3.2 拟合优度检验

拟合优度检验，就是通过定义一个可以反映统计模型与杂波数据拟合程度的统计量，来确定哪一种分布与杂波模型拟合得最好。常见的检验准则有卡方检验、KS 检验、MSD 检验。笔者主要采用 MSD 检验对杂波的拟合优度进行检验。MSD 的检验方法由下式给出：

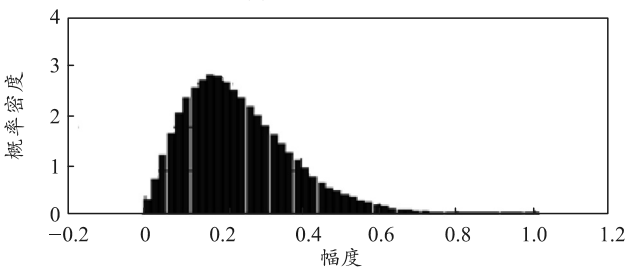
$$D_{msd} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [p_e(x_k) - p_t(x_k)]^2$$

式中： p_e 、 p_t 分别为经验 PDF 与理论 PDF； N 为向量长度； D_{msd} 值越小，表明 2 种分布越相似。

下面对图 4 所示的海杂波原始数据中第 1 000 距离单元的海杂波进行分析。其原始回波如图 6。



(a) 时间特性



(b) 概率密度

图 6 第 1 000 个距离单元概率密度

采用 MSD 检验方法对第 1 000 距离单元原始杂

波数据进行拟合度分析，确定哪一种杂波模型拟合得最好。分析结果如图 7 所示，MSD 检验最终结果见表 1。从检验结果可以看出：第 1 000 距离单元最优拟合为 K 分布，其 MSD 检验结果为 0.002 251 5，说明采用 K 分布进行拟合，其拟合度最高。

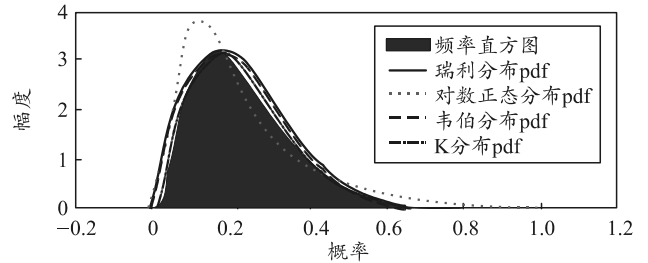


图 7 1 000 个距离单元 MSD 检验结果

表 1 MSD 检验结果

距离单元	瑞利检验	对数正态	韦伯分布	K 分布	最优拟合
1 000	0.016 97	0.121 32	0.002 94	0.002 25	K 分布

3.3 参数估计

确定海杂波的幅度统计模型后，需要估计其分布模型的参数。为更好地拟合海杂波的幅度统计模型，需要估计精度高、计算复杂度小并且适应范围广的参数估计方法。常用的参数估计方法主要有：矩估计法、最大似然估计法、最小二乘法、Nelder-Mead 法。

笔者主要采用矩估计法进行参数估计。下面对 K 分布参数估计二、四阶矩估计法进行介绍。

样本的 k 阶矩为：

$$\hat{m}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^k$$

K 分布的 k 阶矩为：

$$m_k = \frac{\Gamma(1+0.5k)\Gamma(v+0.5k)}{\Gamma(v)}$$

将样本矩和理论矩相结合，理论上可用任意 2 组 k 阶矩来估计 K 分布的参数值。

二、四阶矩估计法

$$\begin{cases} v = \left(\frac{\hat{m}_4}{2\hat{m}_2^2} - 1 \right)^{-1} \\ \alpha = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\hat{m}_2}{v}} \end{cases}$$

按照上述 K 分布参数估计方法，对第 1 000 距离海杂波数据进行参数估计，其参数估计结果如图 8 所示。第 1 000 距离单元 K 分布估计结果为： $v=7.318$ ， $\alpha=0.049 919$ 。

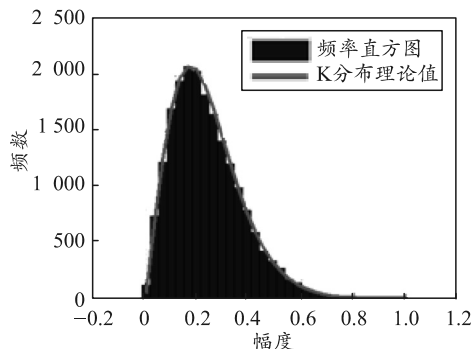


图 8 第 1 000 个距离单元参数估计结果

3.4 海杂数据生成

海杂波仿真的实质就是产生符合给定统计特性的杂波序列。常用生成方法主要有 ZMNL 法和 SIRP 法，即零记忆非线性变化法和球不变随机过程法。

笔者主要采用 SIRP 法生成 K 分布杂波，其原理如图 9 所示。

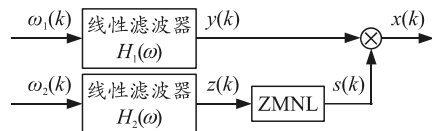
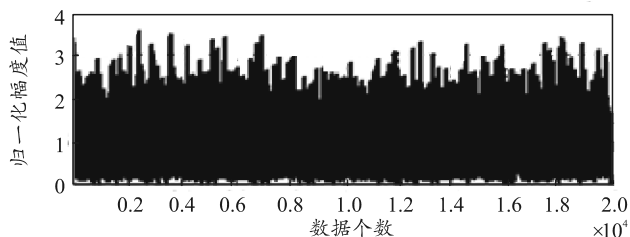


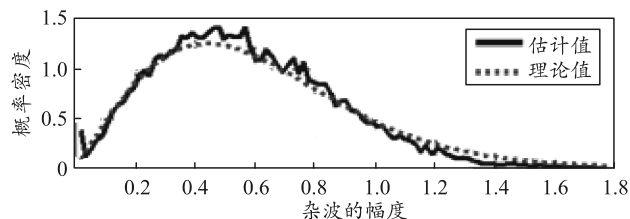
图 9 K 分布杂波生成原理

图中： $\omega_1(k)$ 、 $\omega_2(k)$ 分别为高斯白噪声复数序列和高斯白噪声实数序列，且两者相互独立； $y(k)$ 是具有指定功率谱特性(和生成的杂波序列一致)的高斯序列； $H(\omega)$ 由 $x(k)$ 的相关函数决定，和 ZMNL 中滤波器的设计方法类似； $H_2(\omega)$ 的输出 $z(k)$ 为相关系数接近 1 的高斯序列，可知序列 $z(k)$ 具有高度相关性。由于无需关注 $s(k)$ 的相关特性，所以 $H_2(\omega)$ 通常为一个窄带低通滤波器，保证输出序列的频谱足够窄； $s(k)$ 服从 χ 分布，其概率密度函数和生成的杂波序列概率密度函数一致。

根据上述 K 分布杂波生成方法，对 1 000 距离单元海杂波进行模拟仿真。按照参数估计 $v=7.318$ 、 $a=0.049\ 919$ 仿真生成的 K 分布杂波如图 10 所示，图(a)共产生了 20 000 个数据，图(b)实线为实际分布曲线，虚线为理论曲线。从仿真结果看出两者基本一致。



(a) 杂波归一化时域波形



(b) 生成数据的幅度分布

图 10 1 000 距离单元仿真生成的 K 分布杂波

4 结论

笔者提出了一种基于参数估计修正的海杂波实测数据建模方法，介绍了海杂波数据采集系统组成、采集方案及海杂数据库管理系统，并结合具体实例对 MSD 法拟合优度检验，以及二、四阶矩估计法参数估计及 SIRP 法模拟生成仿真杂波数据建模过程进行仿真计算。仿真结果表明，该方法生成海杂波数据分布规律与原始数据分布一致性。笔者提出的海杂波实测数据建模方法，可直接应用于未来导弹制导系统抗杂波仿真实验，对于提高射频仿真系统抗海杂波干扰模拟逼真度及仿真实验置信度具有一定参考价值。

参考文献：

- [1] DUMPER K, COOPER P S, WONS A F, et al. Spaceborne synthetic aperture radar and noise jamming [R]. Proc. IEEE Radar, 1997.
- [2] SWERLING P. Probability of detection for fluctuating targets[J]. Information Theory, IRE Transactions on, 1960, 6(2): 269-308.
- [3] ANTIPOV I. Simulation of sea clutter returns[R]. Salisbury: Defence Science and Technology Organisation, 1998.
- [4] BILLINGSLEY J B. Low-angle radar land clutter: measurements and empirical models[M]. IET, 2002: 23-25.
- [5] 咎航, 宋万杰, 陈伯孝. 基于多普勒频率相关性的海杂波目标检测[J]. 雷达科学与技术, 2017(3): 26-28.
- [6] 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.
- [7] 欧阳文, 何友, 靳煜. 基于统计模型的时-空相关海杂波仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(2): 467-471.
- [8] 丁昊, 李建忠, 安昕, 等. 实测海杂波数据的多普勒谱特性[J]. 雷达科学与技术, 2012, 10(4): 400-408.
- [9] 黄志宇, 刘保华. 随机信号的功率谱估计及 Matlab 的实现[J]. 现代电子技术, 2002(3): 21-23.
- [10] 邱连龙, 谢军伟, 杨守国, 等. 基于 ZMNL 的雷达杂波仿真研究[J]. 现代防御技术, 2009(1): 138-142.
- [11] 吕雁, 史林. SIRP 法相干相关 K 分布雷达杂波的建模与仿真[J]. 现代雷达, 2002, 24(2): 13-16.