

引用格式:刘恒燕,熊伟,宋杰,等.大入射余角海杂波相关特性分析及幅度拟合[J].电光与控制,2019,26(6):60-64. LIU H Y, XIONG W, SONG J, et al. Correlation analysis and amplitude fitting for sea clutter with large grazing angle[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(6):60-64.

## 大入射余角海杂波相关特性分析及幅度拟合

刘恒燕, 熊伟, 宋杰, 崔亚奇, 吕亚飞  
(海军航空大学信息融合所, 山东烟台 264001)

**摘要:**通过研究入射余角 $44^\circ \sim 69^\circ$ 的海杂波实测数据的时间相关性、空间相关性及幅度统计特性发现,海杂波相关时间维持在毫秒量级,且随着入射余角增加,先增加后减小,时间相关性最强的入射余角在 $60^\circ$ 左右,而平均相关距离单元个数一直增加。针对大入射余角高分辨率海杂波的幅度统计特性提出一种新的海杂波幅度拟合混合分布,并通过KK分布、Rayleigh分布、对数正态分布及K分布的对比,证明了新的混合分布对大入射余角海杂波的拖尾部分具有良好的拟合效果。

**关键词:**海杂波;幅度统计特性;大入射余角;混合分布;时间相关性;空间相关性

**中图分类号:** TN957.51 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.06.012

## Correlation Analysis and Amplitude Fitting for Sea Clutter with Large Grazing Angle

LIU Heng-yan, XIONG Wei, SONG Jie, CUI Ya-qi, LYU Ya-fei  
(Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** The temporal correlation characteristics, spatial correlation characteristics and the amplitude statistics of the measured sea-clutter data with the grazing angle from  $44^\circ$  to  $69^\circ$  were studied. Experiments showed that correlation time of sea clutter was maintained in the order of milliseconds, which increased at first and then decreased with the increasing of the grazing angle, and the strongest correlation time appeared at about  $60^\circ$ . At the same time, the average number of correlation distance units increased with the increasing of the grazing angle. Hybrid distribution, a new sea clutter amplitude fitting distribution, was proposed according to the amplitude statistics. Contrast test was made to the new distribution with such distributions as KK distribution, Rayleigh distribution, lognormal distribution and K distribution. The result shows that the new hybrid distribution has fine fitting effect to the sea clutter with large grazing angle, especially to its tailing characteristics.

**Key words:** sea clutter; amplitude statistics; large grazing angle; mixed distribution; temporal correlation; spatial correlation

### 0 引言

在海杂波幅度统计分布特性研究中,低分辨率海杂波数据常用传统经典分布进行拟合,如Rayleigh分布、对数正态分布及K分布等。随着分辨率的提高,海杂波的统计分布呈现出长拖尾特性且明显偏离Rayleigh分布,此时海杂波具有较强的相关性,常用拟合模型有复合K分布、KA分布、KK分布、神经网络法。

由于入射余角的增大及雷达分辨率的提高,雷达等效后向散射截面积急剧增加,即大多数海杂波分布到较少的距离单元上,能量分布不均匀,出现功率突然增大的异常单元,此时海杂波分布也偏离了原有的经典海杂波幅度统计模型;并且KA分布、KK分布需进行5个参数的估计,由于三阶以上的矩较难计算,实际应用情况并不乐观。2014年ROSENBERG与WATTS等利用Ingara数据研究X波段雷达在入射余角 $15^\circ \sim 45^\circ$ 时海杂波的幅度统计特性,发现K分布无法更好拟合高分辨率大入射余角海杂波的海尖峰特性,尤其是大能量海杂波带来的长拖尾特性。通过进一步分析,提出了在高分辨率大入射余角情况下基本符合K分布的

收稿日期:2018-07-04

修回日期:2019-04-17

基金项目:国家自然科学基金(61790554,61471380,61471381)

作者简介:刘恒燕(1994—),女,山东济南人,硕士,研究方向为信息融合技术。

雷达回波中有不可忽略的 Rayleigh 部分;并提出 K + Rayleigh 模型(K + R 模型)、K + noise 模型(K + N 模型)与 Pareto + noise 模型(P + N 模型)<sup>[1-3]</sup>等在大入射余角(HGA)海杂波背景下具有近乎完美拟合效果的分佈模型,其参数估计方法——矩估计法仅需计算3个参数,有效避免了 KA 分佈等复杂分佈的多参数估计问题。但由于没有闭合表达式,其概率密度函数必须通过数值计算得到,大大增加了计算复杂度,使得一些检测算法如传统 CFAR 算法的效率降低,因此该分佈的应用十分受限,未在检测算法中得到推广<sup>[4-6]</sup>。为解决以上问题,本文提出新的模型,经实测数据验证,该模型能够很好地拟合大入射余角下海杂波分佈。

## 1 海杂波相关特性

### 1.1 时间相关性

时间相关性表明了海杂波在时间维的相关性强弱,直接影响了 CFAR 算法时间滑窗的选取,采用归一化时间自相关函数来衡量,表达式为

$$A = \frac{\sum_{k=0}^t \sum_{n=0}^{m-k} x_n * x_{n+k}^* / \sum_{k=0}^t \sum_{n=0}^{m-k} x_n * x_n^*}{\sum_{k=0}^t \sum_{n=0}^{m-k} x_n * x_{n+k}^* / \sum_{k=0}^t \sum_{n=0}^{m-k} x_n * x_n^*} \quad (1)$$

### 1.2 空间相关性

空间相关性定义为雷达径向或方位向上两个分离的海面距离单元反射信号的相关性<sup>[7-9]</sup>,表明了海杂波在空间维的相关性强弱,直接决定了 CFAR 算法中距离向滑窗的选取,此时采样点间对应的时间间隔通常在微秒量级以下,时间相关性可忽略,实测数据采集过程中方位向变化在 1° 以下,方位向空间相关性可忽略不计,仅考虑径向距离单元的空间相关性,采用海杂波平均反射率的归一化空间自相关函数表示,表达式为

$$S_j = \frac{\sum_{i=1}^{M/2} (\tau_i - \hat{m})(\tau_{i+j} - \hat{m}) / \sum_{i=1}^{M/2} (\tau_i - \hat{m})^2} \quad (2)$$

式中,  $\hat{m} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \tau_i$ ,  $M$  为距离单元连续观测的时间平均值。

## 2 大入射余角海杂波幅度分佈

一般认为低分辨率低入射余角海杂波幅度服从 Rayleigh 分佈,随着雷达分辨率提高,雷达杂波统计直方图呈现严重拖尾现象,为更好地拟合海杂波的拖尾分佈,出现一部分针对高分辨率低入射余角的海杂波模型,如复合 K 分佈、KA 分佈<sup>[10]</sup>、KK 分佈<sup>[11]</sup>、GK 分佈等。研究者又将这些模型应用于大入射余角高分辨率海杂波幅度分佈,发现 KK 模型具有最好的拟合效果,ROSENBERG 与 WATTS 等提出了拟合效果更好的 K +

Rayleigh 等一系列模型,并指出 K 分佈为 K + Rayleigh 的特殊形式,但遗憾的是并没有给出新模型的闭合表达式。因此,找到一种既能避免复杂计算,又能得到比 K 分佈拟合效果更好的分佈具有重要意义。

### 2.1 K 分佈

K 分佈为乘性模型,是现在应用最广泛的海杂波模型,该模型将海杂波解释为快变化分量被慢变化分量调制的现象,慢变化分量为纹理分量,用方根伽马分佈表示,快变化分量为散斑分量,用 Rayleigh 分佈表示。K 分佈的表达式为

$$f(x; v, b) = \frac{b^{v+1}}{\Gamma(v) 2^{(v-1)/2}} x^v K_{v-1} \left( \frac{bx}{\sqrt{2}} \right) \quad (3)$$

式中:  $v$  为形状参数,表示海杂波的拖尾程度;  $b$  为尺度参数,与海杂波功率水平有关;  $K_{v-1}(\cdot)$  为  $v-1$  阶第二类修正 Bessel 函数,其参数可用最大似然估计或矩估计得到, K 分佈被证明在许多场景中具有良好的拟合效果。

### 2.2 KK 分佈及对数正态分佈

雷达性能的提升使其分辨率不断增加,海杂波在高分辨率雷达观测下出现越来越严重的拖尾并偏离 K 分佈, KK 分佈的出现解决了这个问题,该分佈无闭合表达式,现多用混合分佈模型表示。KK 分佈为

$$f_{kk}(x) = (1 - k_0) f_1(x; v_1, b_1) + k_0 f_2(x; v_2, b_2) \quad (4)$$

显然可以看出,当  $k_0$  值为 0 时, KK 分佈就是 K 分佈。

对数正态分佈表达式为

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

式中:  $\mu$  为对数正态分佈均值;  $\sigma$  为其方差。

### 2.3 KR 分佈

通过对某弹载高分辨率雷达挂飞实验实测数据拟合分析发现, K 分佈对高分辨率大入射余角海杂波数据的拖尾部分具有良好的拟合效果,而 Rayleigh 分佈则对剩下的部分具有较好的拟合效果,根据实测数据分佈的特点提出一种仅需进行 3 个参数估计的混合分佈模型 KR 分佈。

Rayleigh 分佈表达式为

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

KR 模型为 K 分佈与 Rayleigh 分佈的加权组合模型,其表达式为

$$f(x) = k_1 \frac{2}{b\Gamma(v)} \left(\frac{x}{2b}\right)^v K_{v-1} \left(\frac{x}{b}\right) + (1 - k_1) \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

式中:  $x \geq 0$ ;  $v > 0$ ;  $b > 0$ 。证明 KR 模型是否为概率密度函数,若

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} f(x) dx &= \int_0^{\infty} k_1 f_1(x) dx + \int_0^{\infty} (1-k_1) f_2(x) dx = \\ &k_1 \int_0^{\infty} f_1(x) dx + (1-k_1) \int_0^{\infty} f_2(x) dx = \\ &k_1 + (1-k_1) = 1 \end{aligned} \quad (8)$$

则 KR 模型为概率密度函数,可用于海杂波幅度拟合。

### 3 KR 分布参数估计方法

#### 3.1 粒子群参数估计法

使用粒子群优化算法估计 KR 分布参数的实现过程如下。

假设寻优迭代的第  $k$  代第  $i$  个粒子的位置为  $z_i^k = (z_{i1}^k, z_{i2}^k, \dots, z_{id}^k)$ , 速度为  $v_i^k = (v_{i1}^k, v_{i2}^k, \dots, v_{id}^k)$ , 其中,  $k = 1, 2, \dots, S$ , 表示种群大小,  $d = 1, 2, \dots, D$ , 表示解的维数。通过代价函数获得当前粒子群的个体极值  $p_{best}$  与全局极值  $g_{best}$  后, 第  $k+1$  代第  $i$  个粒子的位置和速度可计算为

$$\begin{aligned} v_{id}^{k+1} &= \omega v_{id}^k + c_1 rand(p_{best_{id}} - z_{id}^k) + c_2 rand(g_{best_{id}} - z_{id}^k) \quad (9) \\ z_{id}^{k+1} &= z_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (10) \end{aligned}$$

式中:  $\omega$  为惯性权因子, 影响粒子探索新区域的能力及算法的收敛性能;  $rand$  表示  $[0, 1]$  之间的均匀分布随机数;  $c_1$  与  $c_2$  为学习因子(或加速常数), 分别调节向两个极值方向飞行的最大步长, 通常取为 2。

在粒子群优化算法中, 粒子群的运动方向由代价函数决定。常用的代价函数有最大似然函数、统计矩等。考虑到 KR 分布模型的最大似然函数比较复杂, 而其概率密度函数具有较大的拖尾, 导致其理论原点矩与服从 KR 分布的杂波数据的统计矩在阶数较高时会有较大的偏差, 选取杂波数据统计直方图部分采样点的幅度与 KK 概率密度函数相应采样点的幅度的差值的平方和作为代价函数, 即

$$f_{cost} = \sum_{n=1}^N (f_{KK}(n) - h(n))^2 \quad (11)$$

式中:  $f_{KK}(n)$  表示 KK 分布在第  $n$  个采样点上的幅度值;  $h(n)$  表示杂波数据统计直方图在第  $n$  个采样点上的幅度值<sup>[11]</sup>。

#### 3.2 路径增益法参数估计

由于粒子群优化算法易陷入局部最优, 提出了基于路径增益的参数估计方法。假设粒子从拟合效果差的参数点运动到拟合效果好的点, 那么利用参数点进行计算将获得某种不断增加的效益, 这就意味着最优参数点周围的效益远远高于其他区域点获得的效益。解决方案如下: 先让参数空间的 8 个顶角粒子按照最短距离运动到整个参数空间的中心位置, 并计算每个粒子在此运动路径上的参数估计效益, 如图 1 所示。

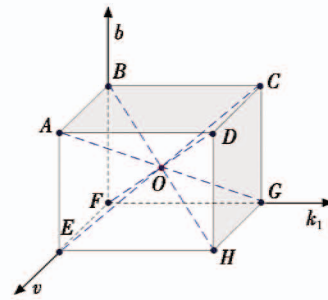


图1 参数空间路径

Fig. 1 Path in parameter space

图 1 中,  $O$  为整个参数空间的中心, 每个顶角与中心的连线即为粒子运动路径, 例如, 顶角  $H$  的粒子运动路径为  $HO$ 。在粒子运动路径上取  $n$  个采样点, 计算每条路径的效益, 并对路径效益由高到低排序, 效益最高即为最优路径。路径效益表达式为

$$e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n err(i) \quad (12)$$

式中,  $err(\cdot)$  为每个采样点与真实数据间的误差。靠近最优点的路径效益最高, 认为最优点出现在此路径“附近”, 如图 2 所示,  $l$  为效益最高的路径, 图中红点为最优点。

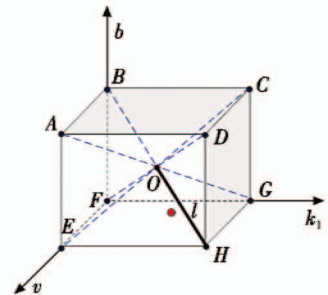


图2 最优点附近的最优路径

Fig. 2 Optimal path near the optimum point

路径  $l$  确定了参数空间中的一个子空间  $\Theta_1$ , 即长方体  $HIJKLMNO$ , 如图 3 所示。

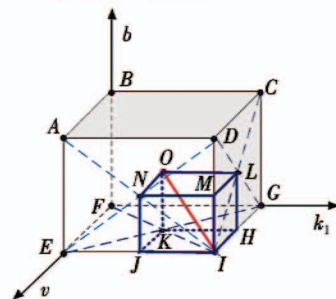


图3 参数子空间

Fig. 3 Parameter subspace

则最优点在参数空间  $\Theta_1$  中, 将  $\Theta_1$  作为新的参数空间重复上述过程, 不断得到新的参数子空间的过程就是一步步逼近最优参数点的过程, 当得到的参数子空间足够小时(通过设置迭代次数实现), 求出参数空间

每个坐标轴的均值,即为最优参数点的坐标。

### 4 实测数据仿真结果

本实验实测数据由某飞机搭载高分辨率正调频Ku(15.8 GHz)波段雷达采集,距离分辨率为1.875 m,信号脉宽为10 μs。

#### 4.1 海杂波实测数据时间相关性

海杂波的时间相关性如图4所示,每个圆圈代表0.2 ms,曲线第一次与1/e相交的点对于横坐标即为相关时间,其中,e为自然对数底。图4的相关时间为5.1 ms。

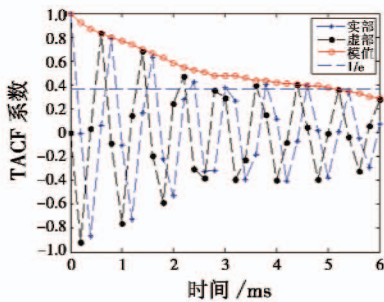


图4 59°入射余角时间相关性

Fig. 4 Temporal correlation at the grazing angle of 59°

不同入射余角下相关时间如表1所示。

表1 不同入射余角下相关时间

Table 1 Correlation time of different grazing angles ms

入射余角/(°)	第1组	第2组	第3组	第4组	第5组	第6组	均值
44	2.2	2.5	3.5	2.1	2.0	2.3	2.4
59	2.5	4.4	3.6	3.4	2.3	2.7	3.2
69	2.0	3.5	1.8	1.7	3.1	2.7	3.0

从表1中可以看出,入射余角从44°增大到69°,随着入射余角增加,海杂波时间相关性先增加后减小,时间相关性最强入射余角在60°左右。

#### 4.2 海杂波实测数据空间相关性

曲线第一次与1/e相交的点对于横坐标即为相关距离单元个数,由于大部分相关距离单元在20个以内,横坐标最大值为20,超过20个距离单元的情况记为20+,实际计算时按照20个进行计算。44°~69°入射余角时间相关性统计如表2所示。

表2 不同入射余角下相关距离单元长度

Table 2 Correlation spatial units of different grazing angles

距离单元	入射余角/(°)		
	44	59	69
[1200,1300)	1	11	1
[1300,1400)	1	2	20+
[1400,1500)	1	1	1
[1500,1600)	1	2	1
[1600,1700)	1	1	1
[1700,1800)	1	1	1
均值	1	3	4

如表2所示,在44°~69°入射余角间,随着入射余角的增加,平均相关距离单元个数也增加,这就意味着当入射余角增加,检测目标需要获得比低入射余角更多的距离单元。

#### 4.3 海杂波实测数据幅度拟合结果

将实测数据分别用K分布、Rayleigh分布、对数正态分布、KK分布进行拟合,并记录其拟合参数及误差,结果如图5所示。

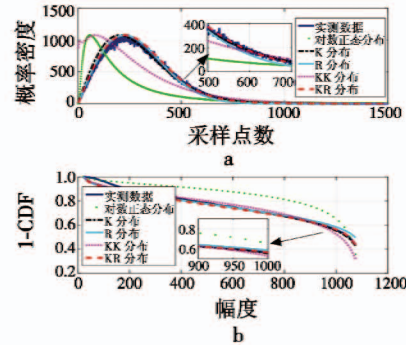


图5 入射余角44°海杂波拟合结果

Fig. 5 Fitting results at the grazing angle of 44°

由图5可知, Rayleigh在杂波的上升阶段拟合效果优于K分布,而K分布则在拖尾部分展现出良好的拟合效果,由于Rayleigh分布在尾部降为零, KR分布对于实测数据拖尾部分的拟合效果与K分布相同,从相对误差函数曲线图来看, KR分布综合了K分布与Rayleigh的优点,在整体拟合上达到了最佳效果。定义平均相对误差小于1大于0.5时,称分布为实测数据的近似有效拟合,大于1时,称拟合失效,小于0.5时,称有效拟合,则KR分布、K分布为有效拟合, Rayleigh分布与KK分布为近似有效拟合,拟合效果最优的是KR分布。

入射余角59°海杂波拟合结果见图6。

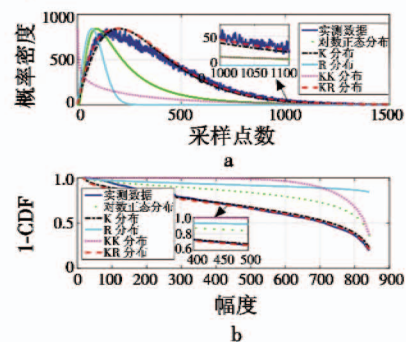


图6 入射余角59°海杂波拟合结果

Fig. 6 Fitting results at the grazing angle of 59°

由图6可知, Rayleigh在杂波的上升阶段拟合效果优于K分布,而K分布则在拖尾部分展现出良好的拟合效果,由于Rayleigh分布在尾部迅速降为零, KR分布对于实测数据拖尾部分的拟合效果与K分布相同,从相对误差函数曲线图来看, KR分布综合了K分布与

Rayleigh 的优点,在整体拟合上达到了最佳效果。KR 分布、K 分布为有效拟合, Rayleigh 分布与 KK 分布为近似有效拟合,拟合效果最优的是 KR 分布。

入射余角  $69^\circ$  海杂波拟合结果见图 7。

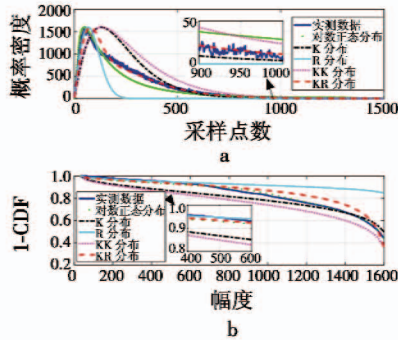


图 7 入射余角  $69^\circ$  海杂波拟合结果

Fig. 7 Fitting results at the grazing angle of  $69^\circ$

由图 7 可知, KR 分布、K 分布为有效拟合, Rayleigh 分布与 KK 分布为近似有效拟合,拟合效果最优的是 KR 分布。各分布参数如表 3、表 4 所示,表中  $T$  为拟合时间,  $\bar{E}$  为平均相对误差。

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x(i) - f(i))^2. \quad (13)$$

由于更多关注的是海杂波拖尾部分的拟合效果,定义平均相对误差超过 1 为拟合失效,大于 0.5 小于 1 为近似有效拟合,小于 0.5 为有效拟合。可以看出 KR 分布一直都是有效拟合, KK 分布及 Rayleigh 分布一直都是近似有效拟合, K 分布有效拟合次数多于近似有效拟合。从拟合时间来看从长到短依次为 KR 分布、KK 分布、K 分布、Rayleigh 分布。

表 3 K 分布及 Rayleigh 分布拟合参数

Table 3 Parameters of K distribution and Rayleigh distribution

参数/ ( $^\circ$ )	K 分布				Rayleigh 分布			
	$b$	$v$	$T/s$	$\bar{E}$	$\alpha$	$T/s$	$\bar{E}$	
44	5	5	3.23	0.32	15.08	$8E-4$	0.52	
59	36	2	3.44	0.15	24.20	$1E-3$	0.87	
69	88	1	3.31	0.20	35.05	$7E-4$	0.85	

表 4 对数正态分布及 KR 分布拟合参数

Table 4 Parameters of logarithmic normal distribution and KR distribution

参 数/ ( $^\circ$ )	对数正态分布				KR 分布					
	方差	均值	$T/s$	$\bar{E}$	$k$	$b$	$v$	$\alpha$	$T/s$	$\bar{E}$
44	5.0740	1.00410	0.0026	3.3178	0.91	2.36	19.35	22.62	26.24	0.29
59	5.2247	0.84261	0.0022	0.6172	0.60	28.59	3.80	24.40	26.28	0.11
69	5.0168	1.06930	0.0438	13.8151	0.32	49.98	5.00	35.05	28.20	0.11

## 5 结束语

KR 分布对高分辨率大入射余角海杂波具有非常

好的拟合效果,避免了 KK, KA 等复杂分布的多参数估计问题,其拟合效果始终优于 K 分布、KK 分布,对数正态分布及 Rayleigh 分布;且随着入射余角增加,其拟合效果越好。本文提出的基于路径增益的几何分割参数估计法,能够在保证估计精度的前提下尽可能降低估计的计算量,此外,利用更少的实测数据进行计算,可以有效避免实测数据中异常值的影响。

## 参考文献

- [1] ROSENBERG L, CRISP D, STACY N J. Analysis of the KK distribution with medium grazing angle sea-clutter [J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2010, 4(2):209-222.
- [2] DONG Y H. Distribution of X-band high resolution and high grazing angle sea clutter DSTO [R]. Canberra: Defence Science and Technology Organisation, 2006.
- [3] ROSENBERG L, WATTS S, BOCQUET S. Application of the K + Rayleigh distribution to high grazing angle sea-clutter [C]//International Radar Conference, 2014. doi: 10.1109/RADAR.2014.7060344.
- [4] 石志广. 基于统计与复杂性理论的杂波特性分析及信号处理方法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.
- [5] 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):4360-4361.
- [6] JAKEMAN E, PUSEY P N. Statistics of non-Rayleigh sea echo [C]//IEEE Radar Conference, 1977:1-4.
- [7] ROSENBERG L. Sea-spike detection in high grazing angle X-band sea-clutter [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, 2013, 51(8):4556-4562.
- [8] CRISP D, KYPRIANOU R, ROSENBERG L, et al. Modelling X-band sea clutter at moderate grazing angles [C]//IEEE International Conference on Radar, 2008. doi: 10.1109/RADAR.2008.4653988.
- [9] ROSENBERG L, CRISP D. X-band performance with medium grazing angle sea-clutter [C]//The 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar, 2010:1-4.
- [10] BOCQUET S. Parameter estimation for Pareto and K distributed clutter with noise [J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2015, 9(1):104-113.
- [11] 高彦钊. 大拖尾雷达杂波模型及其背景下的扩展目标检测方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.