

基于子带合成的超宽带雷达杂波建模与仿真

杨利民 许志勇 苏卫民 顾红 朱墨君
(南京理工大学电子工程与光电技术学院 南京 210049)

摘要: 该文利用子带合成和广义平板模型, 分别在不同的入射角和相对带宽条件下进行超宽带雷达地杂波建模、仿真, 并对杂波统计特性进行分析。首先根据地形将地面划分成若干个小区域(称为广义平板); 把超宽带信号划分成一系列子带(窄带); 然后得出各子带信号在平板模型下的杂波反射系数(σ^0), 最后通过子带合成的方法获得超宽带雷达地杂波模型。通过仿真发现, 超宽带雷达地杂波随着入射角或相对带宽变化时, 杂波的统计分布也跟随变化; 但超宽带雷达杂波的概率密度函数曲线具有“低重心和重拖尾”的共性, 且随着相对带宽的增加, 拖尾加重。仿真结果证明了“频率分割子带合成”法的可行性。

关键词: 超宽带雷达; 子带合成; 广义平板模型; 杂波反射系数

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)09-2172-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01102

Ultra-wideband Radar Clutter Modeling and Simulation Based on Sub-band Synthesis

Yang Li-min Xu Zhi-yong Su Wei-min Gu Hong Zhu Mo-jun
(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Techniques,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210049, China)

Abstract: In this paper, an approach, based on sub-band synthesis and general facet model, is proposed for Ultra-WideBand (UWB) radar ground clutter modeling, simulation and analysis of clutter statistics in the case of different incident angle and relative bandwidth is respectively proposed. Firstly, the facet is divided into a series of small segments (called general facet) according to ground shape; UWB radar work bandwidth is splited into a bank of sub-bands (narrow-bands). The second step is to obtain the individual facet clutter backscattering coefficient (σ^0) from the sub-bands. Finally, the method of sub-band synthesis is utilized to get UWB radar ground clutter model. According to clutter simulation, it is found that the UWB radar ground clutter Probability Density Function (PDF) curve varies with the fluctuation of incident angle or relative bandwidth. However, UWB radar PDF curve is characteristic of “low barycenter and fat tail”, furthermore, the tail become more heavy when the relative bandwidth of UWB radar increase. Simulation results show that the method of “frequency splitting and sub-bands synthesis” is feasible.

Key words: UWB radar; Sub-band synthesis; General facet model; Clutter backscattering coefficient

1 引言

超宽带雷达是指相对带宽不小于 25% 的雷达^[1], 相对带宽定义为 $2(f_H - f_L)/(f_H + f_L)$, 通常情况下超宽带雷达具有很高的距离分辨力。杂波是指雷达接收机接收的不感兴趣的回波^[2]。超宽带雷达分辨率高, 具有良好的杂波抑制能力。尽管如此, 但在雷达设计的分析阶段, 以及在设计过程中的优化阶段, 当还未获取实测数据时, 杂波的建模和仿真依然具有重要的指导意义。

通常杂波建模的方法是利用散射单元的统计特性。电磁波经过散射体反射后具有随机性, 通常采用统计特性描述这一特征^[3,4]。采用统计模型的另一原因是传统的目标检测理论利用杂波的统计特性判断是否存在目标。但是利用单个统计模型几乎不可能描述所有的杂波统计特性, 尤其像超宽带雷达这样的高分辨率雷达, 统计模型不再服从 Rayleigh 之类的典型短拖尾分布^[4]。文献[2]指出杂波幅度统计模型很难通过严格的统计假设来描述其属于何种分布(如 Log-normal 或 Weibull 等)。此外, 杂波统计模型缺乏明显的物理特性, 由此建立的杂波模型不能直接反映测量区域的地形变化特征。

2009-08-21 收到, 2009-11-25 改回

国家部委基金资助课题

通信作者: 杨利民 yamyang559@sohu.com

另一常用杂波建模方法是反映地表面变化特征的传统平板物理建模。由于地貌复杂，利用数学模型精确描述地貌变化情况非常困难，而且在实际杂波建模中几乎不可能。因此，通常对地面模型进行简化。在文献[5]中，视测量区由不同的平板组合而成(即表面由许多小且方向不同的小平板组合)，以简化复杂的地形。每块小平板的反射方向图可视为等尺寸的线性天线，回波为入射波在平板上镜面反射的一部分(法向方向反射最大)。

对于超宽带雷达，文献[6]中描述了物理模型的杂波仿真，但是没有考虑频率的影响。在我们的前期工作^[7]中研究了宽带雷达杂波平板模型，但该模型比较粗简，未考虑诸多细节因素(比如入射波和反射波的极化、地表电磁特性(相对磁导率、介电常数)、地面凹凸不平和植被覆盖等)对超宽带雷达杂波模型的影响。本文采用平板物理模型和“频率分割子带合成”法对超宽带雷达地杂波进行建模和仿真，并且给出了测量区域的杂波统计模型。本文的基本思路是首先根据地形起伏把测量区域划分成若干个称为平板的小区域；根据窄带满足的条件把超宽带划分成一系列的子带(即窄带)。其次建立子带的平板杂波模型。最后对平板内的分辨单元的各个子带贡献利用如逆傅里叶变换(IFT)法进行子带合成，但子带合成不是简单的各个子带的杂波反射系数(σ^0)相加，由于彼此间存在一定的相位关系，所以子带合成事实上是矢量合成。为模拟各种超宽带雷达杂波的细节部分^[8]，在子带合成时还进行了细节的补偿。本文目的是为了在包含不同的地貌和参数变化在内的条件下，通过仿真验证超宽带雷达杂波的一些定性分析的规律，为雷达分析和优化提供参考，而不涉及具体的地貌匹配条件。本文内容布局是：首先讨论平板物理模型；重点分析如何利用子带合成法对一系列子带的平板贡献进行合成；然后对杂波进行仿真并对仿真结果进行分析；最后对全文加以总结。

2 平板模型

2.1 传统平板模型

根据平板物理模型，地表和人工建筑物的传统平板模型示意图见图 1。根据地面地形起伏情况，可划分成大小和方向不同的平板模型，每个平板模型的反射方向图可看作平板天线。根据菲涅耳反射方向，平板天线的最大反射方向位于镜面反射方向。图 2 表示对于理想、光滑平板的反射方向示意图。

该方向图是 sinc 函数，其参数是 L/λ ，其中 L 和 λ 分别是距离向平板长度和雷达信号波长。随着

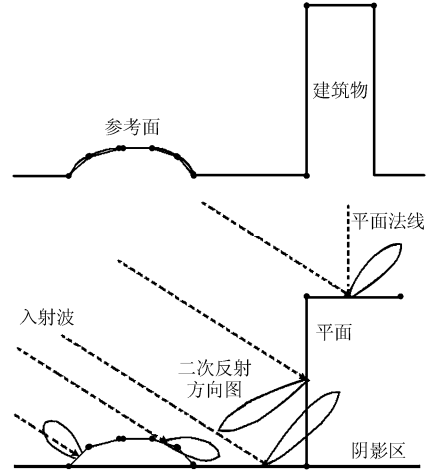


图 1 传统平板模型示意图

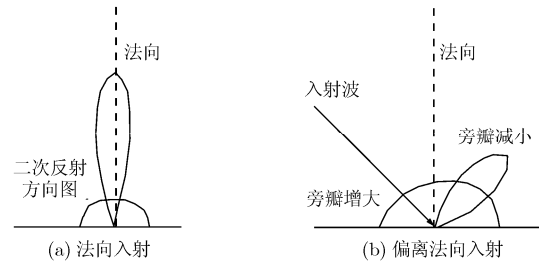


图 2 不同入射角和相对平板长度 L/λ 的平板反射方向示意图

波长增加(或相当于雷达信号频率的减小)，相对平板尺寸减小，导致减少了法向方向上的后向回波，如图 2(b)所示。

2.2 广义平板模型

传统的平板模型没有考虑复杂地形，无论地表的形状如何变化，都认为是简单的平板以不同的方向组合而成。对于平原，该模型具有比较好的适应，但对于人工建筑物或树木等，采用传统的平板模型显然不再合适。广义平板模型除了传统的平板模型外，还包括柱面、二面、边缘和曲面等常见的几何形状。例如，利用柱面模型能较好描述树木，二面描述建筑物墙面和地面构成的二面关系等。几种常见的几何广义平板模型示意图和平板的电磁波入射和反射波传播示意图分别见图 3 和图 4，图 4 中假设入射角和反射角分别为 θ_i 和 θ_s ，且设 $\theta_i = \theta_s = \theta$ ， ϕ (即式(2)中的 ϕ_s) 为反射波在 xoy 平面上的投影与 x 轴之间的夹角。

为了简化，本文只讨论在传统的平板模型基础上，考虑地面凹凸不平以及植被覆盖的情况，模型如下^[8]

$$\gamma_{pq}^c = \frac{k_0^2}{\pi} \cdot L_x \cdot L_y \cdot \left(\frac{\sin k_0 \xi_x L_x / 2}{k_0 \xi_x L_x / 2} \right)^2 \cdot \left(\frac{\sin k_0 \xi_y L_y / 2}{k_0 \xi_y L_y / 2} \right)^2 \cdot |\alpha_{pq}^c|^2 \cdot \exp[-k_0^2 h^2 \xi_z^2] \quad (1)$$

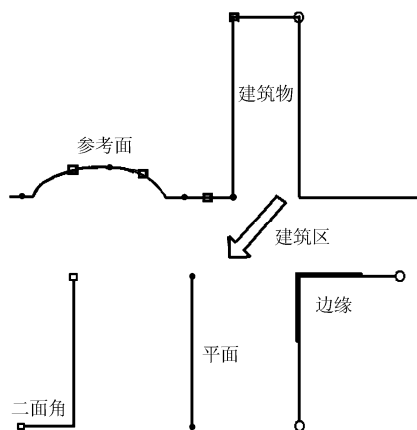


图3 广义平板模型示意图

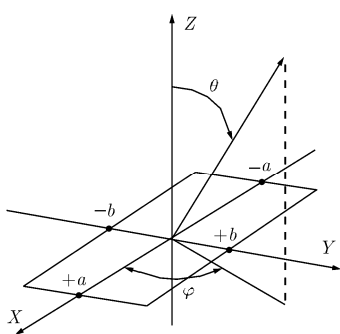


图4 电磁波传播路径示意图

其中

$$\left. \begin{aligned} \xi_x &= \sin \theta_i - \sin \theta_s \cos \phi_s \\ \xi_y &= \sin \theta_s \sin \phi_s \\ \xi_z &= -\cos \theta_i - \cos \phi_s \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

L_x 和 L_y 分别为广义平板的长和宽; p 和 q 分别表示入射和反射的电磁波极性; h 为反映地面凹凸不平的统计参量(设服从高斯分布), 当测量区域平坦时则 $h \equiv 0$; k_0 为波数。式(1)中 α_{pq}^c 与极化散射矩阵元素成正比, 具体为

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{vv}^c &= -\cos \theta_s \cos \phi_s R_{||}(\theta_i) \\ \alpha_{hv}^c &= \sin \phi_s R_{||}(\theta_i) \\ \alpha_{vh}^c &= \cos \theta_i \cos \theta_s \sin \phi_s R_{\perp}(\theta_i) \\ \alpha_{hh}^c &= \cos \theta_i \cos \phi_s R_{\perp}(\theta_i) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中 $R_{||}(\theta)$ 和 $R_{\perp}(\theta)$ 分别为水平和垂直方向上的菲涅耳反射系数

$$\left. \begin{aligned} R_{||}(\theta_i) &= \frac{\varepsilon_r \cos \theta_i - \sqrt{\varepsilon_r \mu_r - \sin^2 \theta_i}}{\varepsilon_r \cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon_r \mu_r - \sin^2 \theta_i}} \\ R_{\perp}(\theta_i) &= \frac{\mu_r \cos \theta_i - \sqrt{\varepsilon_r \mu_r - \sin^2 \theta_i}}{\mu_r \cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon_r \mu_r - \sin^2 \theta_i}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)中 μ_r 和 ε_r 分别为地表面相对磁导率和介电常数。式(1)不但考虑了地面的起伏, 且考虑了入射和

反射波的极性以及地表的电磁特性(介电常数)。通常情况下, 起伏的地表上同时考虑植被覆盖模型更能反映实际地貌。假设植被服从复高斯分布或其他弱拖尾的统计分布(如杂草、农作物等)。则子带平板散射模型为

$$\Gamma_{\theta_0}(f_i, r) = -j [w_p(f_i) \gamma_{pq}^c \exp(\varphi(f_i)) + w_q(f_i) \rho] \cdot e^{-j2\pi f_i r / c} \quad (5)$$

其中 r 表示广义面板和雷达之间的距离; ρ 表示植被(例如杂草、农作物等)引起的复高斯或其他弱拖尾的统计值; $w_p(f_i)$ 和 $w_q(f_i)$ 分别为调节高低不平的地面和植被对杂波数据的贡献大小的权值, 并且假设式(5)中 γ_{pq}^c 的相位 $\phi(f_i)$ 为平板相频特性, 假设服从 $[0, 2\pi]$ 的均匀分布。

从式(5)可以看出, 由于 γ_{pq}^c 中相位和 ρ 都为随机项, 所以 $\Gamma_{\theta_0}(f_i, r)$ 也具有统计特性。对于超宽带雷达, 具有高分辨能力, 强散射体贡献未被平均掉, 导致杂波统计上表现出长拖尾特性, 在杂波仿真部分(见第4节)证实了这一特征。但是对于测量区域茂密的植被, 杂波主要由 $w_q(f_i) \rho$ 决定。综上可看出, 广义平板模型更能反映地形变化以及植被覆盖的常见情况。

3 子带合成

一系列子带杂波的贡献通过子带合成的方法实现超宽带雷达杂波建模。假设超宽带雷达带宽为 B_W , 从而距离分辨率为 $\delta R = c/(2B_W)$ (c 为光速)。对于位于 r_k ($k=1, 2, \dots$), 长为 L 的平板, 覆盖的距离门个数 $M = \lfloor L/\delta R \rfloor$, 其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示下取整。那么平板中第 m 个距离门和雷达之间的距离为

$$S_{k,m} = r_k + \left(m - \frac{M+1}{2} \right) \delta R, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

由式(6)得位于 r_k ($k=1, 2, \dots$) 处平板的第 m 个分辨单元的杂波模型(雷达目标截面积为)

$$x_k(s_{k,m}) = \sum_{i=1}^I W(f_i, r) \cdot \Gamma_{\theta_0}(f_i, r) \cdot \exp(-j2\pi f_i (s_{k,m} - r_k) / c) \quad (7)$$

式(7)事实上是逆傅里叶变换(IFT), 其中 I 为子带个数; f_i 为第 i 个子窄带的中心频率; r_k 为平板中心斜距; $W(f_i, r)$ 为包含多径和杂波细节等因素在内的共同引起的衰落复因子, 由 Lognormal 分布的模归一化的径向细节序列经傅里叶变换得到, 反映窄带分辨单元中的杂波起伏, 表示对子带杂波细节的补偿, 因为子带合成时, 导致子带间杂波细节的光滑化^[8]。由式(7)计算杂波反射系数^[9]为

$$\sigma^0 = x_k(s_{k,m}) / A \quad (8)$$

其中 A 为距离分辨单元的面积。

4 杂波仿真与分析

本文杂波仿真条件为：测量区为长 15 m(即 L)，宽 1 m 的裸地，即设式(5)中的 $w_p(f_i)=0.8$, $w_q(f_i)=0.1$ ；式(6)中 $r_k=5$ km；入射波和反射波均为水平极化(记为 H-H)；超宽带频率分割的子带相对带宽为 1%；图 4 中 $\varphi=180^\circ$ ；式(7)中 $W(f_i, r)$ 服从(0,10)的 Lognormal 分布。分别比较入射角和相对带宽的变化对杂波统计特性的影响(其他条件见 4.2 和 4.3 节)。先介绍度量拟合程度的柯尔莫诺夫-斯米尔诺夫检验(Kolmogorov-Smirnov test)方法。

4.1 柯尔莫诺夫-斯米尔诺夫检验(Kolmogorov-Smirnov test, K-S test)

K-S test 是基于累积分布函数，用以检验两个经验分布是否不同或一个经验分布与另一个理想分布是否不同。K-S 统计量量化了样本经验分布函数和累计分布函数之间的距离，是度量拟合函数与直方图吻合程度的一种统计量^[10]。经验累积分布函数(ECDF)记为

$$F_n(x) = 1/n \cdot [\text{参考的个数} \leq x] \quad (9)$$

则由式(9)得 K-S 统计量(D)

$$D = \max_{1 \leq i \leq n} \left(F(x_i) - \frac{i-1}{n}, \frac{i}{n} - F(x_i) \right) \quad (10)$$

4.2 入射角对杂波的影响

第 4 节开始的条件外，另设图 4 中 θ 分别为 15° 和 75° (入射角分别为 15° 和 75°)；中心频率为 6 GHz，相对带宽为 25%(即 5.25 GHz~6.75 GHz)；第 1 组仿真数据(进行 15 次统计独立仿真的)杂波如图 5、

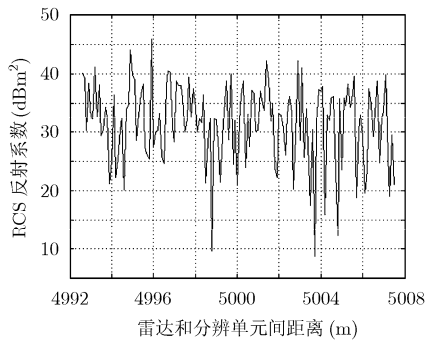
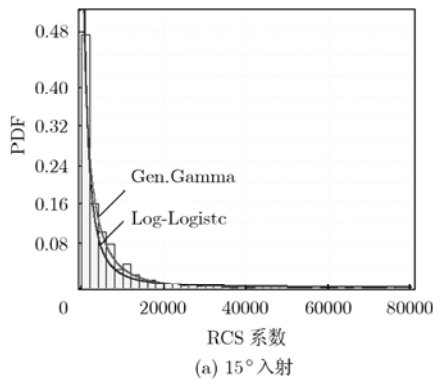


图 5 入射角为 15° 的杂波



(a) 15° 入射

图 6 所示。

图 5 和图 6 分别给出入射角在 15° 和 75° 时的杂波散射系数与平板斜距的关系，通过两图对比可发现入射角为 15° 时的杂波比 75° 的杂波要强，因为在地貌情况不变的情况下，入射角增大，根据菲涅耳反射得知，后向散射的杂波减小。所以在其他条件相同时，随着入射角增大，杂波强度减弱(法向杂波强度最大)。进行 15 次统计独立重复试验时，杂波数据直方图及其拟合曲线如图 7 所示。

从图 7 发现，杂波散射系数 PDF 拟合曲线均具有“低重心、重拖尾”的特点，所谓“低重心”是指在杂波散射系数(σ^0)近 0 处具有最大的概率。通过图 7(a), 7(b)发现入射角越小(越接近法向方向)时，拖尾加重，这是由于接近法向方向时，散射特性变强造成的。利用最大似然估计法(MLE)^[11]估计的参数和拟合情况(K-S 统计量 D)如表 1 所示。

表 1 入射角分别为 15° 和 75° 的 MLE 参数估计和拟合

视角	分布	参数估计值	K-S 统计量 (D)
15°	Gen.Gamma	$k=0.52906$ $\alpha=1.7708$ $\beta=1139.7$	0.0218
	Log-Logistic	$\alpha=1.0886$ $\beta=2091.5$	0.0735
75°	Gen.Pareto	$k=0.09767$ $\sigma=380.26$ $\mu=-5.9052$	0.0154
	Weibull	$\alpha=0.93787$ $\beta=405.87$	0.0241

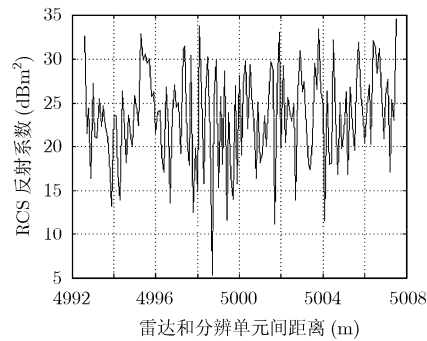
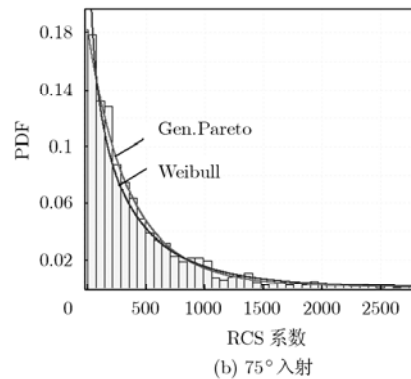


图 6 入射角为 75° 的杂波



(b) 75° 入射

图 7 杂波统计拟合

从表 1 得知当入射角为 15° 时杂波服从 Gen. Gamma 分布, 入射角变成 75° 时则服从 Gen. Pareto 分布。对图 7 拟合的 PDF 曲线进行比较, 杂波幅度值截止到其联合概率密度函数(记为 CDF)值为 0.9 时对应的幅度值大小且归一化, 如图 8(a)所示; 图 8(b)是入射角分别为 15° 和 75° 的拟合 PDF 曲线在 CDF 值为 0.9 处对应的值和相对位置比较。图 8(b)中 A(杂波幅度值为 975.9471)和 B(杂波幅度值为 1.246×10^4)点分别表示入射角为 15° 和 75° , CDF 值为 0.9 时对应的杂波反射系数位置。

由图 8 分析得知, 对于较小的入射角, 在 CDF 为 0.9 时对应的杂波反射系数位置更远离 0 散射系数的位置, 这也是由于较小的入射角具有更长的拖尾导致的。

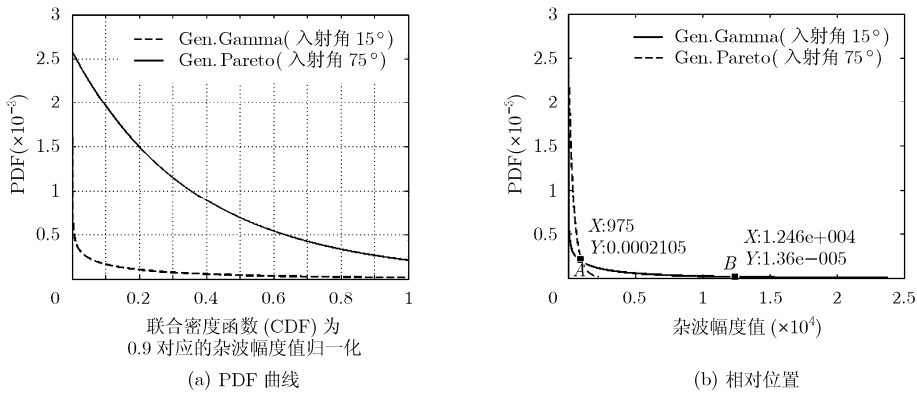


图 8 CDF 为 0.9 的杂波反射系数归一化时 PDF 曲线和杂波系数相对位置比较

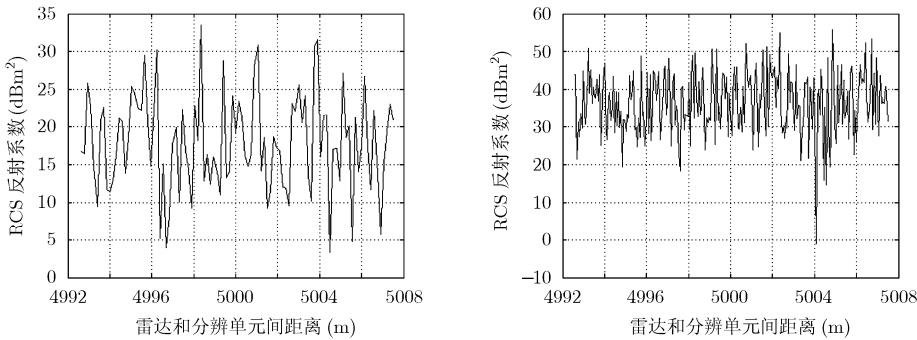


图 9 相对带宽为 10% 的杂波

图 10 相对带宽为 25% 的杂波

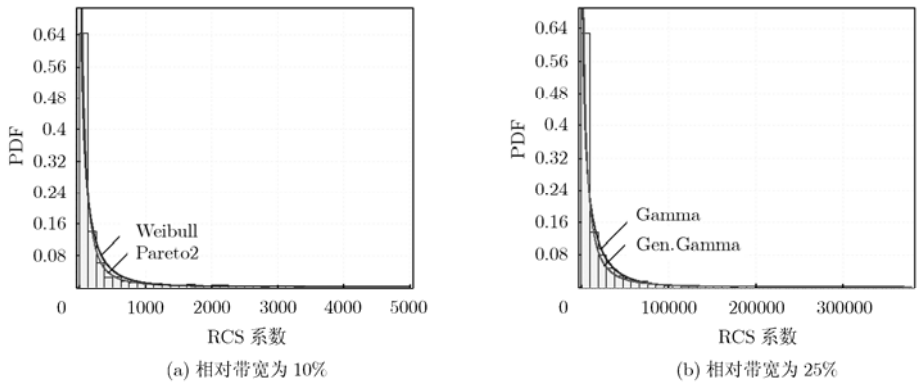


图 11 杂波统计 PDF 拟合曲线

4.3 相对带宽对杂波的影响

除第 4 节开始的条件外, 另设图 4 中 θ 为 15° ; 中心频率为 10 GHz, 相对带宽分别为 10%(9.5 GHz~10.5 GHz)和 25%(8.75 GHz~11.25 GHz), 第 1 组仿真数据(总共进行 15 次统计独立仿真)的杂波如图 9, 图 10 所示。

图 9 和图 10 分别给出入射角在 15° , 中心频率为 10 GHz, 相对带宽分别为 10%和 25%的杂波散射系数与平板斜距的关系。从图中看出图 10 的杂波幅度比图 9 强, 这是由于在中心频率不变而相对带宽增加时, 子带数量也增加, 所以图 10 杂波幅度要强。进行 15 次统计独立重复试验时, 杂波数据直方图及其拟合曲线如图 11 所示。

从图 11 也发现, 杂波散射系数 PDF 拟合曲线同样具有“低重心、重拖尾”的特点, 对图 11(a)、11(b)发现相对带宽增加时拖尾变长, 由于 PDF 曲线全面积为 1, 所以在 0 散射系数处概率下降。利用最大似然估计法(MLE)^[11]估计的参数和拟合情况(K-S 统计量 D)如表 2 所示。

表 2 相对带宽分别为 10%和 25%的 MLE 参数估计和拟合

相对带宽	分布	参数估计值	K-S 统计量(D)
10%	Pareto 2	$a=1.2273$ $b=101.38$	0.0218
	Weibull	$a=0.63788$ $b=172.25$	0.0735
25%	Gen.Gamma	$k=0.29357$ $a=3.7681$ $b=71.51$	0.0154
	Gamma	$a=0.48857$ $b=30880.0$	0.0241

从表 2 得知当相对带宽为 10%时杂波服从 Pareto2 分布, 当相对带宽为 25%时则服从 Gen.Gamma 分布。对图 11 中拟合的 PDF 曲线进行比较, 但杂波幅度值截止到其 CDF 值为 0.9 时对应的幅度值大小, 且归一化, 如图 12 所示。相对带宽为 10%和 25%时, 对应的 CDF 为 0.9 时的杂波反射系数分别为 569.8036 和 4.48×10^4 。

由图 12 分析得知, 对于较大的相对带宽, 在 CDF 为 0.9 时对应的杂波反射系数位置更远离 0 散射系数的位置, 这是由于较大的相对带宽具有更长的拖尾导致的。综合 4.2 节和 4.3 节仿真结果比较分析如下:

(1)从图 7 和图 11 发现, 杂波散射系数 PDF 拟合曲线均具有“低重心、重拖尾”的特点。表现出重拖尾是由于宽带/超宽带具有高距离分辨能力, 强散射体可能超过一个或多个距离门, 表现出强反射特性, 不像窄带信号由于存在大量的弱散射体可能抵消强散射体的贡献, 所以对于宽带/超宽带雷达杂

波 PDF 曲线均具有重拖尾; 和窄带相比, 重心更低(杂波统计分布重心向低散射系数方向移动), 其原因是因为高距离分辨率, 极强散射体可能遮蔽一定数量的且比其弱的散射体, 形成极弱散射或 0 散射(完全遮蔽), 所以 PDF 曲线重心同时往 0 散射系数方向移动。由于杂波的“低重心、长拖尾”的特性, 和窄带雷达相比, 宽带/超宽带雷达具有更大的动态范围, 从而易造成雷达接收机的饱和甚至过载, 导致系统的损坏。

(2)其他条件相同, 而入射角变化时, 杂波统计分布也随着变化, 如图 7(a), 7(b)及表 1(当入射角为 15° 时服从 Gen.Gamma 分布, 当入射角为 75° 时, 则服从 Gen.Pareto 分布)。同样, 对于其他条件相同而只有相对带宽变化时, 杂波统计分布也发生变化, 见图 11(a), 11(b)及表 2(当相对带宽为 10%时服从 Pareto2 分布, 当相对带宽为 25%时服从 Gen.Gamma 分布)。由此发现对于宽带/超宽带雷达, 无法用单一的统计模型对其建模, 这和窄带雷达杂波模型(通常地杂波服从具有弱拖尾的 Rayleigh 分布)具有普适性有很大不同。因此如果依然对宽带/超宽带杂波采用统计建模带来很大的困难, 这也是本文采用杂波物理建模的原因之一。此外, 由于传统的目标检测是采用莱曼-皮尔逊(Neyman-Pearson)准则, 该准则是基于统计模型的, 所以宽带/超宽带雷达杂波统计模型随参数变化而变化的特性为目标检测带来挑战。

(3)由图 8 和图 12 分析得知, 对于较小的入射角和较大的相对带宽, 在 CDF 为 0.9 时对应的杂波反射系数位置更远离 0 散射系数的位置, 这也是由于较小的入射角和较大的相对带宽具有更长的拖尾导致的。但由此会导致虚警概率增大, 为雷达目标检测、辨识和数据处理到来困难, 更有可能在强散射体占优的分辨单元内由于很小的信杂比(SCR)而导致目标被“淹没”, 造成距离盲区。

5 结束语

本文采用物理平板模型和子带合成法对超宽带雷达杂波进行建模。首先根据地形把地面划成若干个小区域, 同时把超宽带分成一系列子带; 然后分别计算子带的杂波贡献; 最后利用子带合成得到超宽带雷达杂波的模型。通过统计模型建模只能适应具体地形、季节和某时间的杂波情况; 传统的平板模型把测量区域看作由一序列平板以不同方向组合而成, 不能反映如树木(柱面)、建筑物和地面组成的面(二面)等几何特征。带有子带合成的广义平板模型不但反映了地面凹凸不平, 植被覆盖的现象,

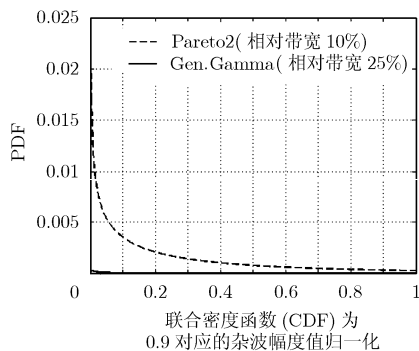


图 12 CDF 为 0.9 的杂波幅度值归一化时拟合的 PDF 曲线(相对带宽 10%和 25%)

而且考虑了地表面的电磁特性(如介电常数)和电磁波入射和反射的极化特性,具有高保真性。仿真结果表明,对于超宽带雷达杂波,在其他条件相同的情况下,入射角或者相对带宽的变化,杂波的统计分布也跟随变化,所以对于超宽带雷达杂波不能用固定的统计分布对其建模,同时由于长拖尾的杂波容易导致虚警概率增大,因此给目标检测带来困难;同时超宽带雷达杂波都具有长拖尾的统计分布特征,在接近0反射系数(σ^0)处概率密度最大,即杂波概率密度函数曲线具有“低重心,重拖尾”特点,且随着相对带宽的增大,拖尾加重,则超宽带雷达具有更大的动态范围,从而容易出现接收机的饱和甚至过载现象。仿真结果表明“频率分割子带合成”法是可行的。

参 考 文 献

- [1] Taylor J D. Introduction to Ultra-wideband Radar System[M]. USA, CRC Press, Inc., 1995: 1-2.
- [2] Skolnik M I. Radar Handbook[M]. 3rd ed.. New York, McGraw-Hill, Inc., 2008: 14.
- [3] Anastassopoulos V, Lampropoulos G A, and Drosopoulos A, *et al.* High resolution radar clutter statistics[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(1): 43-60.
- [4] Greco M S and Gini F. Statistical analysis of high-resolution SAR ground clutter data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(3): 556-575.
- [5] Fernandez G, Grajal A F, and Yeste-Ojeda J, *et al.* Analysis of ISAR images of a helicopter by a facet model[C]. *IEEE International Conference on radar*, Adelaide, Australia, sept. 2-5, 2008: 32-37.
- [6] Jackson J A and Moses R L. Clutter model for VHF SAR imagery[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2004, 5427: 271-282.
- [7] Xu Zhi-yong. Subband synthesis method for simulation of wideband radar clutter[C]. *IET International Radar Conference*, Guilin, China, April 20-22, 2009: 714.
- [8] Ruck G T, Barrick D E, and Stuart W D, *et al.* Radar Cross Section Handbook Volume 2[M]. New York, Plenum Press, 1970: 700-702.
- [9] Skolnik M I. Introduction to Radar Systems[M]. 3rd ed.. New York, McGraw-Hill, Inc., 2001: 403-404.
- [10] Stephens M A. EDF statistics for goodness of fit and some comparisons[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1974, 69(347): 730-737.
- [11] Liang Jing, Liang Qi lian, and Samn S W. Foliage clutter modeling using the UWB radar[C]. *IEEE International Conference on Communications*, Beijing, China, May 19-23, 2008: 1937-1941.

杨利民: 男, 1981年生, 博士, 研究方向为超宽带雷达信号处理.

许志勇: 男, 1968年生, 副教授, 研究方向为信号与信息处理.

苏卫民: 男, 1959年生, 教授, 研究方向为信号与信息处理.