

# 双基地前向散射雷达杂波分析与模拟方法

胡 程<sup>1</sup> 刘长江<sup>1</sup> 曾 涛<sup>1</sup> 周 超<sup>2</sup>

(1. 北京理工大学信息与电子学院, 北京, 100081; 2. 苏州大学电子与信息学院, 苏州, 215006)

**摘 要:** 雷达杂波的统计特性研究与仿真模拟对雷达系统的设计、仿真、开发有重要意义。文中通过对前向散射雷达地表植被杂波实测数据的处理, 观察到前向散射雷达杂波的幅度分布特性可根据风速和动态范围的不同分别采用 K 分布和对数正态分布拟合; 同时杂波数据的谱分析结果表明可以采用全极点模型对前向散射雷达杂波建模。基于对杂波统计特性的分析, 文中给出了一种 SIRP 法和 ZMNL 法相结合的前向散射雷达杂波模拟方法, 模拟得到的杂波与实测杂波数据在统计特性上相一致, 证实了模拟方法的有效性。

**关键词:** 前向散射雷达; K 分布; 全极点模型; 杂波模拟

中图分类号: TN959 文献标识码: A 文章编号: 1003-0530(2013)03-0293-11

## Statistical Analysis and Simulation Method of Forward Scattering Clutter in Bistatic Radar

HU Cheng<sup>1</sup> LIU Chang-jiang<sup>1</sup> ZENG Tao<sup>1</sup> ZHOU Chao<sup>2</sup>

(1. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;  
2. School of Electronics and Information, Soochow University, Suzhou 215006, China)

**Abstract:** The research of statistical properties and simulation methods of radar clutter has vital importance to the design, simulation and development of radar systems. Based on the analysis of some experimental data of forward scatter radar (FSR) clutter, it was found that at low wind speed and in narrow dynamic range, the amplitude of FSR clutter was subject to K distribution; while at high wind speed or in wide dynamic range, it was subject to lognormal distribution; the power spectrum was subject to the all-pole model. With the above statistical analysis, the forward scattering coherent clutters were simulated using a method combining zero-memory nonlinear transformation with spherically invariant random process. The statistical properties of simulated clutter were identical to those of measured clutter, which verified the validity of this method.

**Key words:** forward scatter radar; K distribution; all-pole model; clutter simulation

### 1 引言

杂波可定义为任何无用的雷达回波<sup>[1]</sup>。由于这些回波混杂了雷达的输出, 增加了目标检测、成像与识别的难度。因此, 需要深入研究和了解杂波的各种特性

并依此进行雷达信号处理, 进而增强雷达在各类杂波环境中的工作能力。

作为一种特殊的双基地雷达, 前向散射雷达 (Forward Scatter Radar, FSR) 的双基地角大于  $135^\circ$ , 用于检测和识别在基线附近运动的目标。目前, 针对单基地

收稿日期: 2012-08-22; 修回日期: 2013-02-03  
基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61172177)

雷达地表物理杂波统计特性研究的文献较多。FSR 与单基地雷达工作原理有所不同,FSR 是基于电磁波的衍射特性,而不是后向散射特性;此外,FSR 缺少距离分辨率;在光学区域目标 RCS 迅速增强。鉴于 FSR 系统与单基地雷达系统的众多差异,在单基地雷达系统

中地物杂波的统计模型是否仍然适用于 FSR 系统还有待于进一步的验证。同时,在 FSR 系统中,由于缺少距离向分辨率,收发天线照射区域内大面积的杂波混入接收信号中,杂波强度非常大,对目标检测、成像与识别产生巨大影响,这使得 FSR 中杂波特性的研究更为迫切。

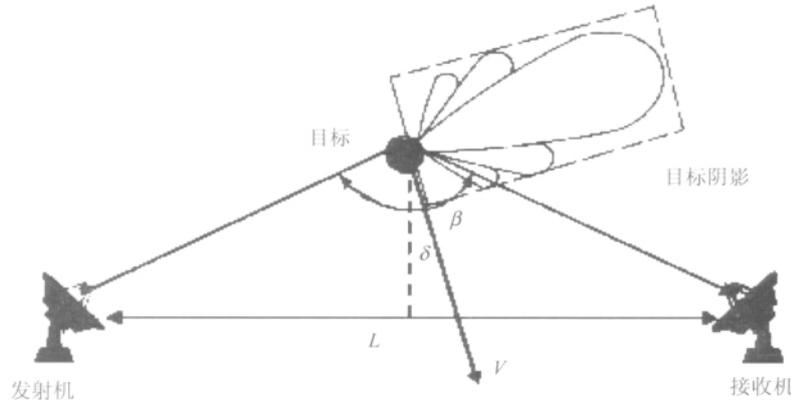


图1 前向散射雷达系统结构

Fig. 1 Structure of forward scatter radar system

在地面 FSR 系统中,通常利用相干包络检波的方式来采集数据,直达波和静止物体的干扰可以被充分抑制,因此其杂波来源主要为被风吹动的植被和非感兴趣的虚假目标(如昆虫、飞鸟、小动物等),本文研究的对象是前者。已公开的针对单基地雷达地表物理杂波统计特性的研究表明:对于均匀地面,低分辨率雷达、高擦地角情况,地杂波幅度分布可采用瑞利分布描述;而对于雷达分辨率较高、擦地角较低的情况,地杂波按观测条件差异,将分别服从韦布尔分布、对数-正态分布或 K 分布,这三种分布的共同特点是在幅度较大时概率密度衰减较慢,即“拖尾”严重;对于地杂波的功率谱特性通常采用高斯模型、马尔柯夫模型和全极点模型来拟合<sup>[4-10]</sup>。文献[11]和[12]中利用钟摆模型对 FSR 杂波进行物理建模,基于对实测数据的处理,观测到 FSR 杂波的谱宽很窄,且对风速和载频都不敏感。文献[13]中基于对 FSR 杂波实测数据的统计特性分析指出:高斯分布难以较好拟合的 FSR 杂波中大幅度杂波的概率密度分布;并提出利用 10 阶 AR 谱对 FSR 杂波信号的功率谱进行建模,在频率较低

时拟合效果良好,但随着频率升高该模型精确度下降。文献[14]利用韦布尔分布对工作于 VHF/UHF 频段的 FSR 植被杂波进行概率分布拟合,在频率较低(64MHz 时)以及低风速的情况下,对实测杂波幅度拟合效果较好。但随着风速提高和载波频率升高(135MHz 时),韦布尔分布严重偏离了实测杂波的概率密度统计结果。

本文基于大量 FSR 地表植被杂波实测数据,通过拟合杂波的幅度分布和功率谱分布特性,给出了不同风速和不同动态范围内,FSR 植被杂波的幅度分布和功率谱分布数学模型;然后基于实测数据的统计模型,给出了基于零记忆非线性变换法和球不变随机过程法的双基地前向散射雷达杂波仿真方法,可实现不同风速、不同强度的双基地前向散射雷达杂波模拟,并通过与实测数据对比,验证了双基地前向散射雷达杂波模拟方法的有效性。

## 2 双基地前向散射雷达植被杂波统计特性分析与建模

雷达杂波通常可以描述为具有不同统计特性的随

机过程。其中幅度特性和功率谱特性分别从不同角度给出了不同的信息,这对于我们研究如何从杂波背景中提取有用信号并进行杂波抑制是非常有意义的。实际雷达测量表明,大多数雷达杂波都是相关的,明确杂波的相关特性或谱特性对动目标处理非常关键。因此,通过仿真所产生的雷达杂波数据必须同时满足对幅度特性和功率谱特性的要求。目前常用的杂波幅度概率分布模型包括:瑞利分布、对数正态分布、韦布尔分布和 K 分布等,常用的杂波功率谱模型主要有柯西模型和全极点模型。

### 2.1 实验配置与数据采集

在 FSR 系统中,地杂波主要来自收发天线波束共同照射区域内的众多散射体前向散射信号的矢量和。由于 FSR 系统通常采用相干包络检波的数据采集方式获得目标信号,因此静止物体的影响可以被有效抑制,杂波主要来源是被风吹动的地表植被,例如:草丛、树木或灌木等。因此,为了研究 FSR 地杂波统计特性,我们针对树林、灌木丛、草地等植被,进行了大量杂波数据采集。发射机和接收机使用全向天线,直接放置在地面上,高度约 30cm。工作频率为 VHF/UHF 波段,包括 151MHz、434MHz、869MHz。不同时刻的风速也被记录下来用于杂波幅度和谱特性分析。典型的实验场景如下图所示:



图 2 杂波数据采集实验场景

Fig. 2 Experiment scene where the clutter data was collected

在不同工作频率、不同风速情况下,FSR 接收到的杂波实测数据如下图所示:

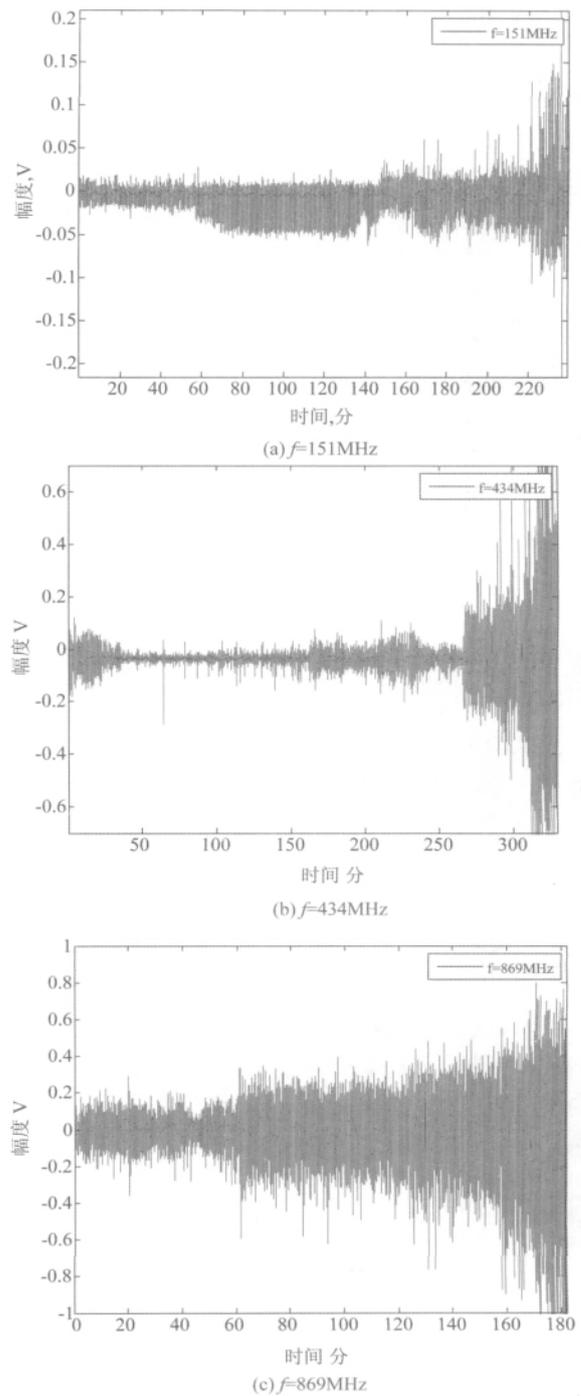


图 3 杂波实测数据

Fig. 3 Measured data of FSR clutter

根据对应的风速记录可知,杂波强度随着风速的增加而增加。为了分析不同风速和频率下植被杂波的幅度分布情况,对实测的杂波数据按风速进行分类,根据幅度方差由弱到强分别记为风速 1 到风速 5。

### 2.2 双基地前向散射雷达杂波幅度特性分析与建模

首先对不同风速、不同载波频率以及宽动态范围内的实测杂波数据进行直方图统计,求得各自的概率密度函数,再基于参数估计结果利用不同分布模型对实测数据进行拟合。具体处理过程如下所述:

1. 将地面 FSR 系统在不同载波频率和不同风速下采集的实杂波数据进行希尔伯特变换,得到正交的复杂波信号。
2. 对复杂波信号进行幅度直方图统计,得到概率密度分布图。
3. 对不同风速及载频下的每一组实测杂波数据分别进行瑞利分布、韦布尔分布、K 分布和对数正态分布的参数估计。
4. 在参数估计的基础上对实测杂波数据的概率密度进行拟合。

下面分别给出不同载波频率、不同风速以及宽动态范围下,实测杂波数据的概率密度统计结果以及分布拟合结果。

从图 4.5.6 的杂波幅度拟合结果可以看出,在不同频率下拟合效果都呈现相同的趋势:在风速较小(风速 2)时,K 分布可以较好的拟合地杂波的幅度分布,其比瑞利分布和韦布尔分布对拖尾的拟合更精确;而在风速较大(风速 5)以及宽动态范围下,杂波的幅度分布由于具有较大的拖尾,用对数正态分布拟合更为精确。这是因为在风速很大时,强散射体(如大的树枝或树干等)开始摆动,这些杂波源的尺寸接近或大于波长,前向散射效应使得杂波源的 RCS 迅速增大,大幅度杂波的概率也随之迅速升高。考虑对数分布动态范围较大,具有“大拖尾”的特点,可以取得较好的拟合效果。

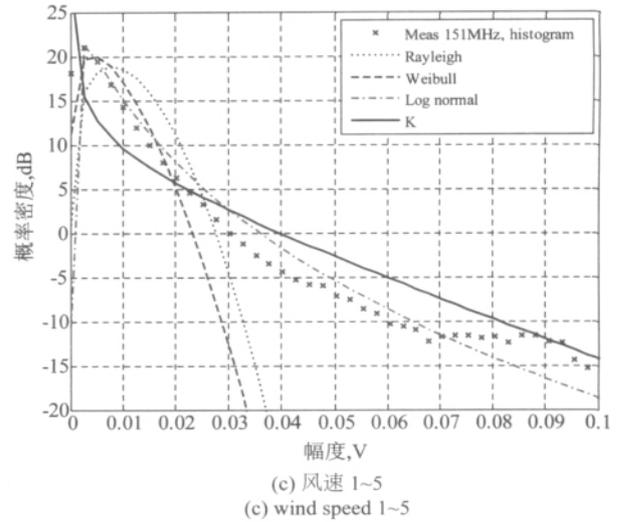
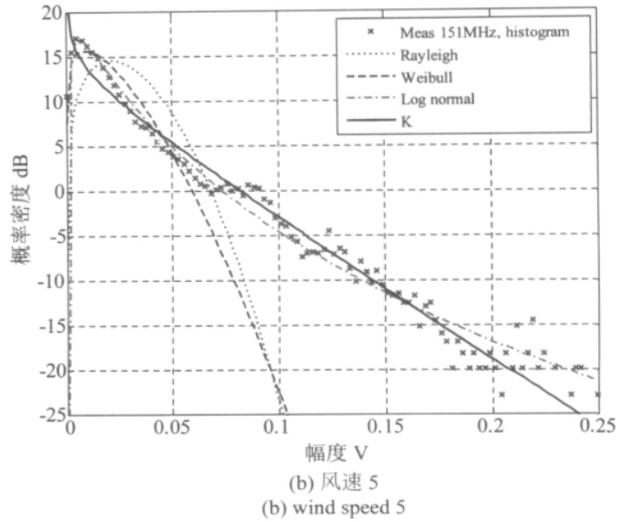
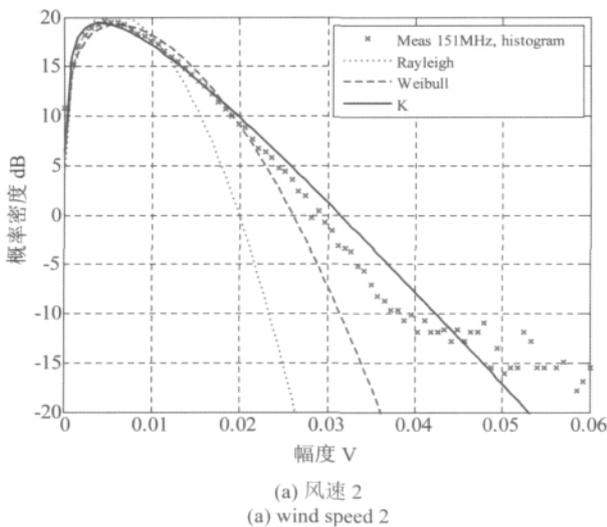
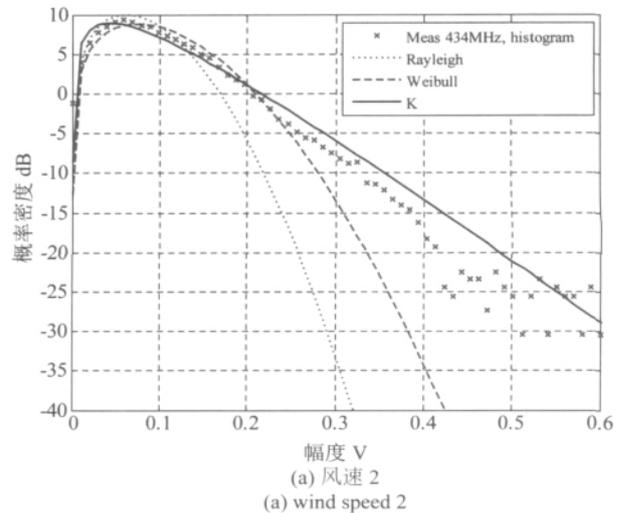


图 4  $f=151\text{MHz}$  时,杂波数据拟合结果  
Fig. 4 Fitted clutter PDF results at  $f=151\text{MHz}$



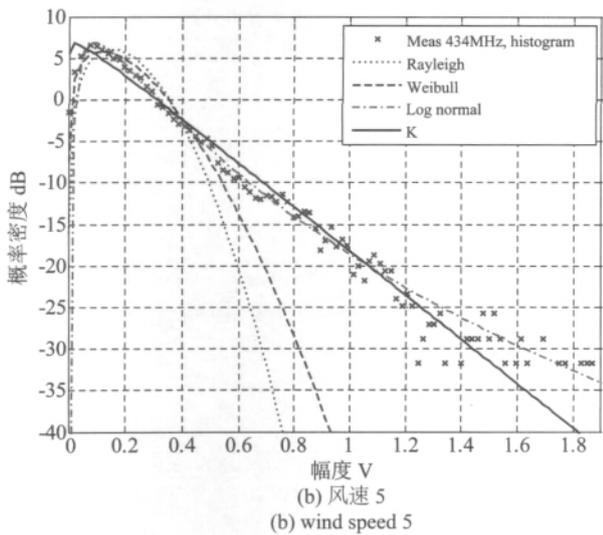
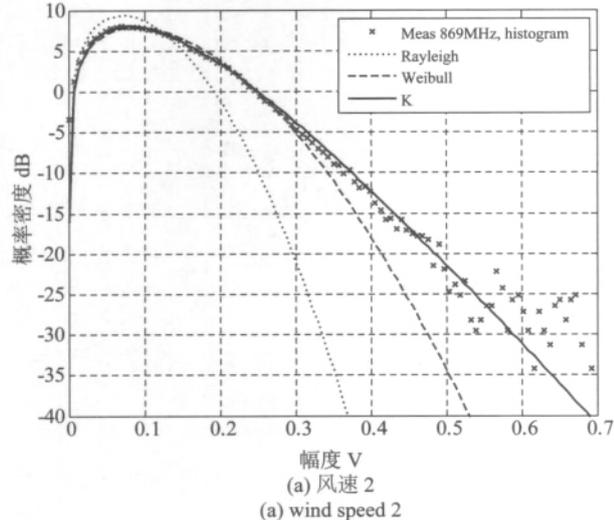


图 5  $f=434\text{MHz}$  时, 杂波数据拟合结果

Fig. 5 Fitted clutter PDF results at  $f=434\text{MHz}$



(a) 风速 2  
(a) wind speed 2

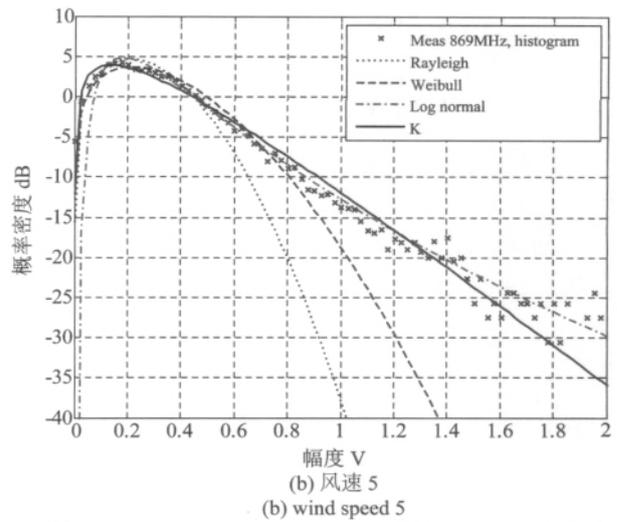
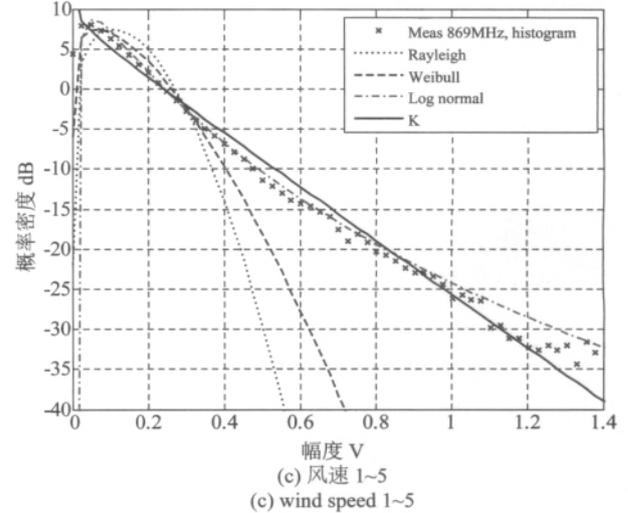


图 6  $f=869\text{MHz}$  时, 杂波数据拟合结果

Fig. 6 Fitted clutter PDF results at  $f=869\text{MHz}$



(b) 风速 1~5  
(c) wind speed 1~5

表 1 风速 1 ~ 风速 4 的 K 分布参数

Tab. 1 K-distribution parameters at wind speed 1 to wind speed 4

频率	风速 1		风速 2		风速 3		风速 4	
	$V$	$\alpha$	$\nu$	$\alpha$	$\nu$	$\alpha$	$\nu$	$\alpha$
151MHz	3.25	0.0015	3	0.0028	1.4	0.006	1.1	0.0081
434MHz	3.5	0.023	3.1	0.0315	2.5	0.048	2	0.07
869MHz	3.2	0.02	3.3	0.0375	3.35	0.05	3.2	0.072

表 1 给出了风速 1 ~ 风速 4 时, 不同载波频率下 FSR 植被杂波的 K 分布参数。其中  $\nu$  是形状参数, 反映了 K 分布的偏斜度, 通常在 0.1 ~ 10 之间变化, 当  $\nu \rightarrow \infty$  时, 分布接近瑞利分布。 $\nu$  越小与瑞利分布的偏差越大, 分布的不对称性更明显, 杂波拖尾越大。 $\alpha$  是尺度参数  $\alpha = [\sigma^2 / (2\nu)]^{1/2}$ ,  $\sigma^2$  是杂波的平均

均功率。对比分析表1中的数据可以发现,在工作频率为151MHz和434MHz时,随着风速的增大,形状参数 $\nu$ 减小,尺度参数 $\alpha$ 增大,说明风速增大,大幅度杂波概率升高,拖尾变大,同时杂波平均功率也随之升高。对比151MHz和434MHz同级风速下的参数可以发现,随着频率的升高,形状参数变化较小,而尺度参数变化却在10倍左右,这表明当频率提升时,杂波幅度的概率分布曲线改变很小,但杂波强度急剧增加。对比三种频率下的形状参数和尺度参数可以看出,随着频率的持续提高,风速对形状参数的影响趋于减小,杂波幅度的概率分布曲线在不同风速下趋于一致;同时随着频率的持续提高,频率变化引起杂波强度的增加也趋于减弱,但并不影响风速增大杂波强度增加的趋势。

表2给出了风速5和长时间观测(风速1~5)时,不同载波频率下FSR植被杂波的对数正态分布参数。其中 $\sigma_c$ 是形状参数,表示分布的偏斜度; $\mu_c$ 是尺度参数,表示分布的中位数。

表2 风速5和风速1~5的对数正态分布参数  
Tab. 2 Lognormal distribution parameters at wind speed 5 to wind speed 1-5

频率	风速		1~5	
	$\sigma_c$	$\mu_c$	$\sigma_c$	$\mu_c$
151MHz	0.95	0.012	0.95	0.004
433MHz	0.7	0.15	1	0.025
869MHz	0.6	0.27	0.7	0.1

### 2.3 双基地前向散射雷达杂波功率谱估计与建模

功率谱估计方法众多,这里采用常用的改进周期图法——Welch法——对FSR植被杂波进行功率谱估计。Welch法又叫加权交叠平均法,这种方法以加窗(加权)取平滑,以分段重叠求平均,相对于经典谱估计中的自相关法和周期图法这种方法得出的谱估计是无偏的,方差也小。对不同风速和不同载波频率下的实测杂波功率谱估计结果如下图所示:

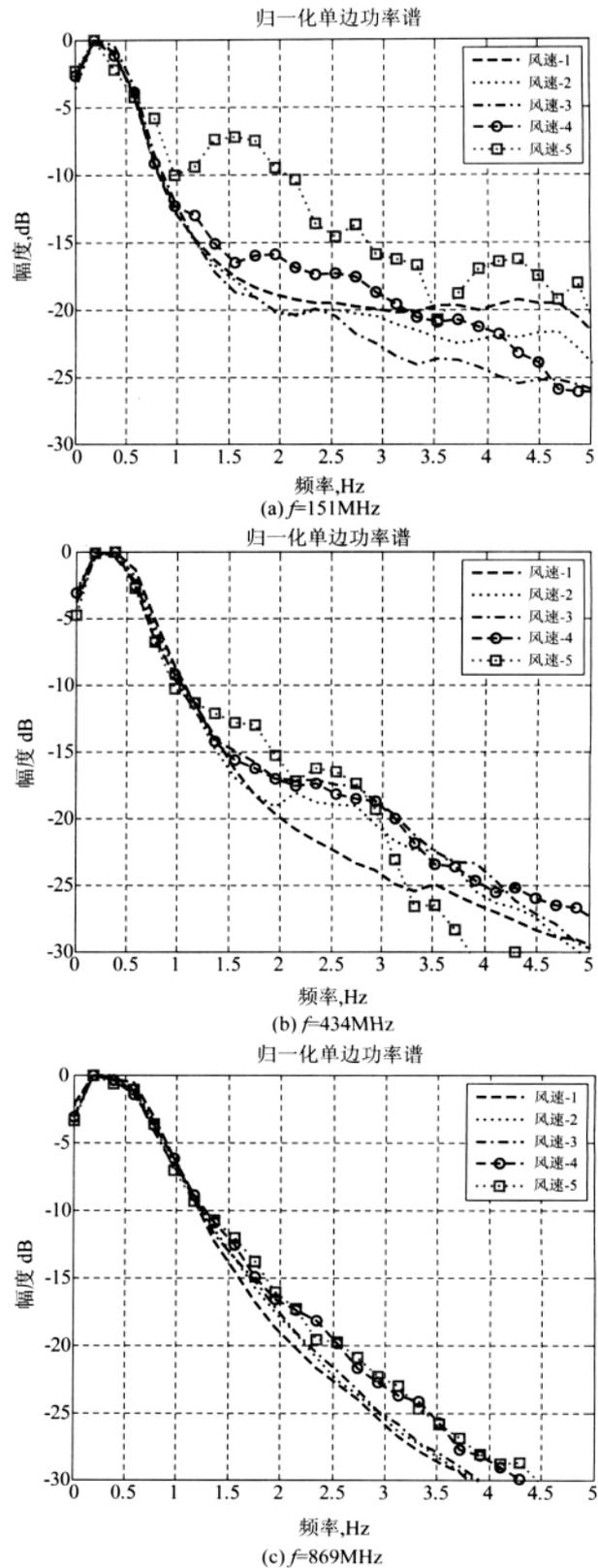


图7 实测杂波数据功率谱估计(归一化后)

Fig. 7 Power spectrum estimation of measured data (normalized)

观察发现,不同风速下的杂波功率谱形状几乎相同,也就说,前向散射情况下杂波的谱宽展对风速并不敏感。并且,随着频率的提高,不同风速下杂波功率谱密度变化减小,功率谱模型趋于稳定。

在文献 [18] 中,FSR 植被杂波功率谱采用 10 阶 AR 模型拟合。但拟合结果表明在载波频率较低时(如 151MHz、433MHz)拟合的效果较好,自回归 10 阶 AR 谱形状非常接近真实的功率谱,然而随着载波频率升高(如 869MHz),高阶谐波的影响越来越严重,10 阶 AR 模型已经无法精确地拟合真实的杂波功率谱。本文采用全极点模型拟合 FSR 植被杂波功率谱,在高载频时取得了很好的效果。拟合结果如下图所示:

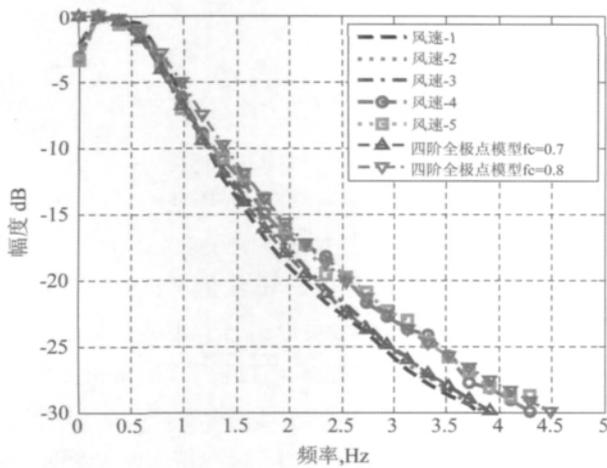


图 8  $f=869\text{MHz}$  时,实测杂波数据功率谱拟合结果(归一化后)

Fig. 8 Fitted power spectrum result of measured data (normalized) at  $f=869\text{MHz}$

由图 8 可知,当频率为 869MHz 时,采用全极点模型拟合 FSR 植被杂波功率谱,效果非常好。在风速不是很大(风速 1~风速 3)时,截止频率  $f_c=0.7$  的四阶全极点模型曲线与杂波功率谱曲线几乎完全重合;随着风速提高(风速 4~5),可以考虑用截止频率  $f_c=0.8$  的四阶全极点模型对杂波功率谱进行拟合。

图 9 是载波频率分别为 151MHz 和 434MHz 时,利用全极点模型对杂波功率谱进行拟合的结果。由图可知,当载频较低时,杂波功率谱拖尾较大,四阶功率谱难以精确拟合拖尾,可以考虑用更低阶的全极点模型对杂波功率谱进行拟合。折中考虑对低频段和拖尾的拟合效

果,当频率为 151MHz 时,选择三阶全极点模型,  $f_c=0.57$ ; 当频率为 434MHz 时,选择 2.5 阶全极点模型  $f_c=0.45$ 。

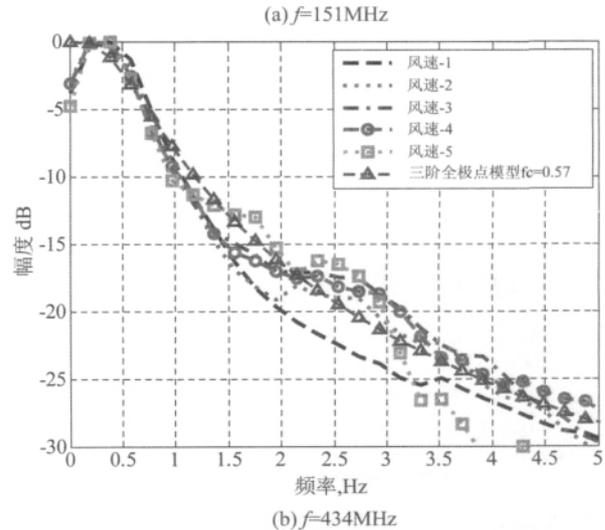
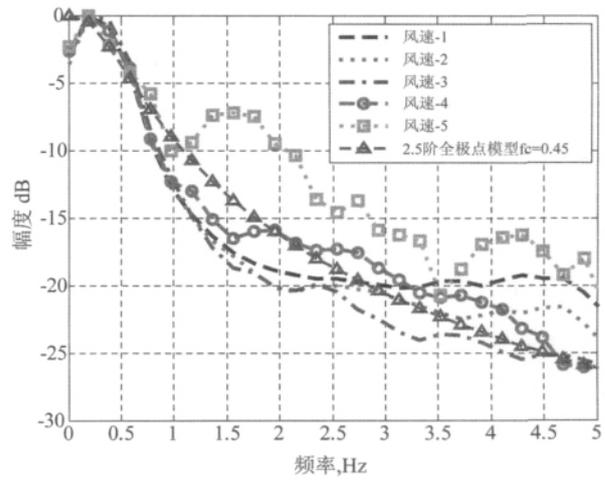


图 9 实测杂波数据功率谱拟合(归一化后)

Fig. 9 Fitted power spectrum result of measured data (normalized)

### 3 双基地前向散射雷达杂波模拟

测试雷达的各项性能指标是雷达系统设计、研制和生产中不可或缺的部分。由于条件限制(人力、财力和物力和研制周期等),多数情况下往往不可能全部进行实地试验。而信号模拟器可以提供包含杂波干扰在内所需要的雷达信号,并且具有经济、灵活和可重复使用等优点,已经成为雷达系统研制过程中重要的组成部分。其中,由于能够逼真地反映目标背景环境,杂波模拟部分成为雷达信号模拟器设计中极其重要的内

容。由于真实雷达杂波几乎都是相关的,因此在杂波模拟时要兼顾其幅度分布特性和相关特性或谱特性。因此,从本质上讲,雷达杂波模拟的核心是产生同时满足幅度分布要求和功率谱密度要求的随机序列<sup>[21-25]</sup>。为了满足对FSR性能分析的要求,本文给出了基于零记忆非线性变换法(ZMNL)和球不变随机过程法(SIRP)相结合的前向散射雷达杂波模拟的方法,可以模拟仿真满足幅度分布和功率谱分布需求的前向散射雷达杂波。

### 3.1 双基地前向散射雷达杂波模拟方法

零记忆非线性(ZMNL)变换法的基本原理是:将相关高斯随机过程经过非线性变换得到所需的相关非高斯序列。该方法应用前提是必须先得到非线性变换输入与输出的相关函数之间的非线性关系。这种方法概念较为清楚,但寻找ZMNL变换的非线性关系时比较复杂,而且并不是具有任意相关函数的随机序列都可以由ZMNL变换产生。

利用ZMNL变换法产生非高斯相关随机序列的原理图如下所示:



图10 产生非高斯相关序列的ZMNL变换法原理框图  
Fig. 10 Illustrative diagram of ZMNL transformation to create a non-Gaussian coherent sequence

在球不变随机过程法(SIRP)中,输出 $z(k)$ 是两个过程的乘积: $z(k) = s(k)y(k)$ ,其中 $y(k)$ 是零均值的复高斯序列。 $s(k)$ 是非负的实平稳序列,且与 $y(k)$ 之间相互独立。也可以说,输出序列 $z(k)$ 是通过序列 $s(k)$ 对复高斯过程调制实现的。该模型的一个显著优点就是能够分别控制生成序列的概率密度函数和相关函数,缺点是受所求序列的阶数及自相关函数的限制使得运算速度较慢。利用SIRP法产生非高斯相关序列的基本原理框图如下所示:



图11 球不变随机过程法原理框图

Fig. 11 Illustrative diagram of spherically invariant random process

为进一步分析杂波对SISAR成像的影响,我们需要模拟相参形式的FSR杂波。杂波模拟的目的是产生一个相参相关K分布随机信号,其功率谱密度服从全极点模型。K分布随机信号可以看做两个随机变量相乘,其中慢变分量表示快变分量的平均电平,它与广义chi分布拟合得很好;而快变分量存在由慢变分量决定的平均电平,服从瑞利分布。

下面用ZMNL法和SIRP法结合的方法对FSR相参杂波进行模拟,具体实现框图如下:

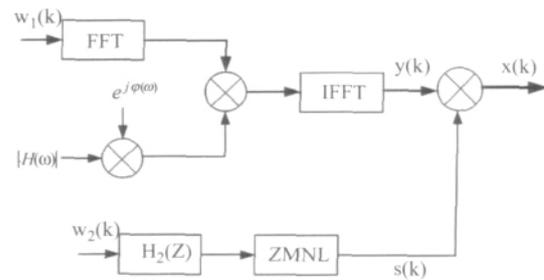


图12 低风速窄动态范围FSR植被杂波模拟框图

Fig. 12 Simulation diagram of FSR ground clutter at low wind speed and narrow dynamic range

总体而言,该方法是用SIRP法仿真相参相关K分布随机信号。该随机信号可以由一个非负的服从广义chi分布的实变量调制相关高斯过程获得,而相关高斯过程的功率谱服从全极点模型。其中,广义chi分布实变量可采用ZMNL方法产生;功率谱服从全极点模型的高斯过程可采用频域法产生。

### 3.2 双基地前向散射雷达杂波仿真流程

仿真过程如下所述:

(1) 首先,产生一个复相关高斯随机矢量 $\omega_1(k)$ 。方法如下:

- ①生成两组正交的零均值白高斯随机序列作为复白高斯序列的实部和虚部;
- ②将复白高斯序列进行傅里叶变换后与传递函数 $H(\omega) = \sqrt{S_0/1 + (\omega/\omega_c)^n}$ 相乘;
- ③进行逆傅里叶变换,生成功率谱服从全极点模型的复高斯随机序列。

(2) 产生chi分布随机变量 $s(k)$ ,方法如下:

- ①产生均值为0,方差为 $\sigma^2$ 的实高斯白噪声序列,然后通过窄带滤波器;

②求解非线性方程<sup>[25]</sup>

$$g[\nu E(y^2) s^2 / (\alpha^2 \pi)] = 1 - Q(z) \quad (1)$$

式中  $g(a, b) = \frac{1}{\Gamma(b)} \int_0^a e^{-t} t^{b-1} dt$  为不完全伽马函数。  $y$  为滤波器  $H_1$  的输出  $z$  为滤波器  $H_2$  的输出  $\nu$  是 K 分布形状参数  $\alpha$  为 K 分布尺度参数。由  $\alpha = \sqrt{\sigma^2 / (2\nu)}$  及  $E(y^2) = \sigma^2$  可知, 式(1)可变换为:

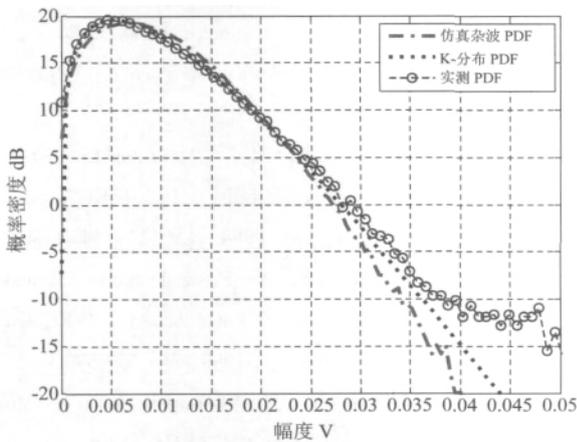
$$g(\nu, 2\nu s^2 / \pi) = 1 - Q(z) \quad (2)$$

$Q(z)$  为标准正态随机变量的尾部面积, 即有:

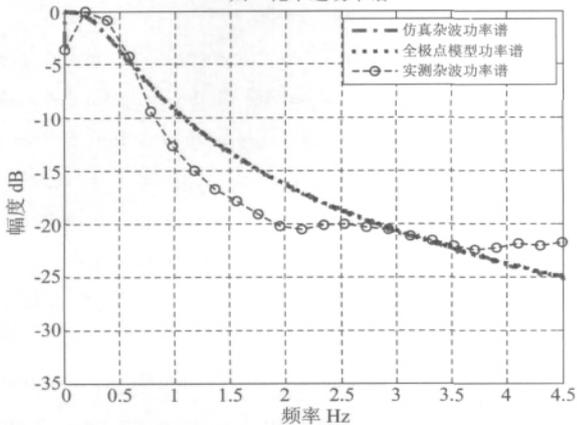
$$Q(z) = \int_x^\infty \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (3)$$

(3) 由  $x = sy$  给出的乘积得到 FSR 相参杂波。

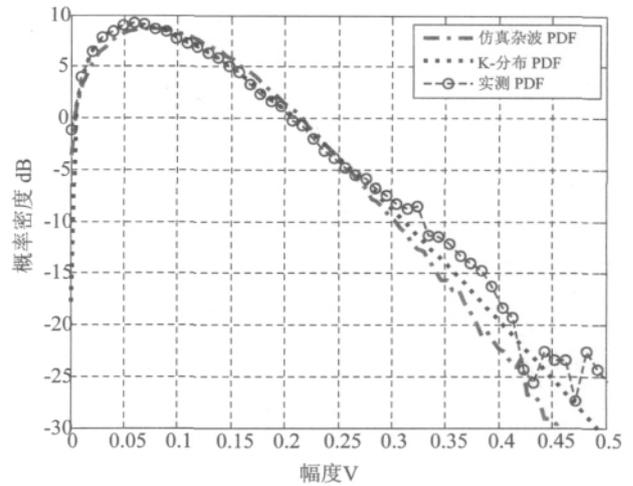
基于上述方法以及由实测数据估计所得的杂波参数, 不同工作频率下具有全极点模型功率谱的 K 分布 FSR 地杂波仿真结果如图 13 所示:



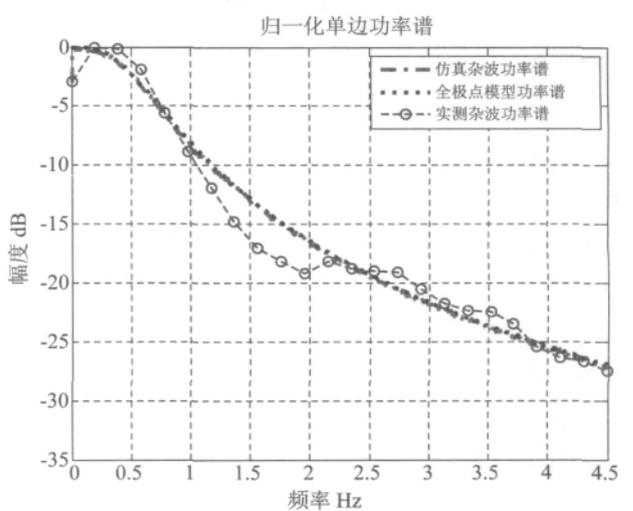
(a) 151MHz 杂波幅度分布  
(a) 151MHz clutter PDF  
归一化单边功率谱



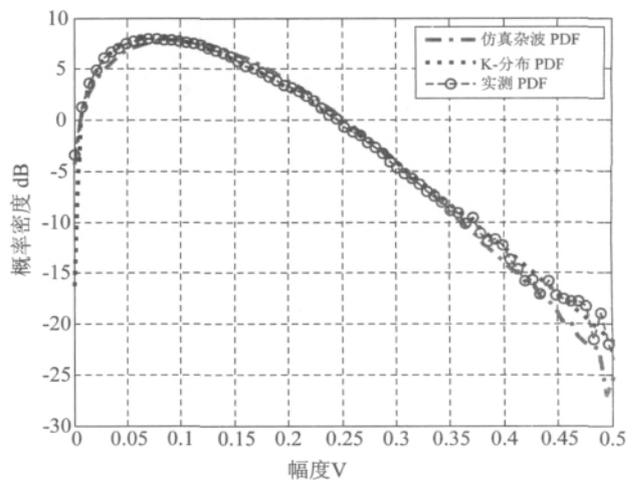
(b) 151MHz 杂波功率谱(归一化)  
(b) 151MHz clutter power spectrum (normalized)



(c) 434MHz 杂波幅度分布  
(c) 434MHz clutter PDF  
归一化单边功率谱



(d) 434MHz 杂波功率谱(归一化)  
(d) 434MHz clutter power spectrum (normalized)



(e) 869MHz 杂波幅度分布  
(e) 869MHz clutter PDF

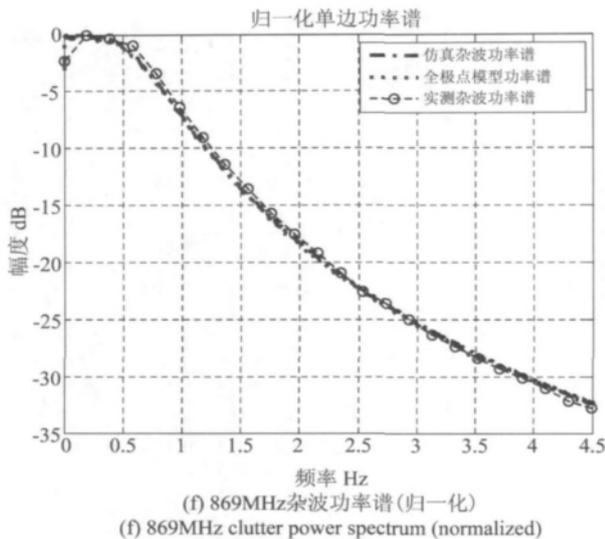


图13 风速2下的杂波仿真结果

Fig. 13 Simulation results of clutter at wind speed 2

其中,图13-(a)(c)(e)中红色虚线是仿真杂波的概率密度,黑色点划线是K分布的理论曲线,蓝色圈线是实测杂波的概率密度分布。图13-(b)(d)(f)中红色虚线是仿真杂波的功率谱估计结果,黑色点划线是全极点模型的理论曲线,蓝色圈线是实测杂波功率谱估计结果。由图可知,仿真杂波数据的直方图统计结果以及功率谱估计结果既满足了FSR植被杂波幅度分布特性的要求,又与功率谱模型精确吻合,验证了本节给出的杂波模拟方法的有效性。

#### 4 结论

本文基于大量实测FSR地表植被杂波数据,根据统计特性处理和分析结果,证实了在风速低、动态范围窄时,杂波幅度服从K分布;当风速高或动态范围宽时,杂波幅度服从对数正态分布。同时发现采用全极点模型可对FSR杂波功率谱精确建模。基于杂波统计模型,采用SIRP和ZMNL相结合的方法仿真了FSR相参杂波,仿真杂波的统计特性可以很好的吻合真实杂波的统计特性。杂波的模拟仿真对FSR动目标检测、成像、识别以及FSR系统设计与性能测试均有很大的使用价值。

#### 参考文献

- [1] Skolnik M I. RADAR Handbook [M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1990.
- [2] Willis N J. Bistatic Radar [M]. Boston, MA: Artech House Inc., 1991.
- [3] Cherniakov M. Bistatic Radar: Principles and Practice [M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2007.
- [4] Jao J K. Amplitude distribution of composite terrain radar clutter and the K-distribution [J]. IEEE Trans Anten Propag, 1984, 32: 1049-1062.
- [5] Billingsley J B. Low-Angle Radar Land Clutter-Measurements and Empirical Models [M]. Noyes: William Andrew Publishing, 2002.
- [6] Sekine M, Mao Y. Weibull Radar Clutter [M]. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990.
- [7] Farina A, Gini F, Greco M V, et al. High Resolution Sea clutter data: A statistical analysis of recorded live data [J]. IEE Proceedings, 1997, 144(3): 121-130.
- [8] Giannakis G B, Tsatsanis M K. A unifying maximum-likelihood view of cumulant and polyspectral measures for non-Gaussian signal classification and estimation [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, 38(2): 386-406.
- [9] Giannakis G B, Tsatsanis M K. Time-domain tests for Gaussianity and time-reversibility [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(12): 3460-3472.
- [10] Billingsley J B, Farina A, Gini F, et al. Statistical analyses of measured radar ground clutter data [J]. IEEE Trans Aerospace Electronic Systems, 1999, 35: 579-593.
- [11] Sizov V, Hu C, Antoniou M, Cherniakov M. Vegetation clutter Spectral properties in VHF/UHF bistatic Doppler radar [C]. 2008 IEEE Radar Conference. Rome: Curran Associates Inc., 2008. 26-30.
- [12] Hu C, Long T, Zeng T, etc. Physical modeling and spectrum spread analysis of surface clutter in forward scattering radar [J]. Science China-Information Sciences, 2010, 53(11): 2310-2322.
- [13] Hu C, Long T, Zeng T. Statistic characteristic analysis of forward scattering surface clutter in bistatic radar [J]. Science China-Information Sciences, 2010, 53(12): 2675-2686.
- [14] Gashinova M, Cherniakov M, Zakaria N A. Empirical model of vegetation clutter in forward scattering radar micro-sensors [C]. Radar Conference, 2010 IEEE. Washinton,

2010. 899-904.
- [15] Hu C, Antoniou M, Cherniakov M. Quasi-optimal signal processing in ground forward scattering radar [C]. 2008 IEEE Radar Conference. Rome: Curran Associates Inc., 2008. 1-6.
- [16] Zeng H B, Hu C, Li T. The signal to noise ratio analysis of ground forward scattering radar [C]. IET International Radar Conference 2009. Guilin: Institution of Engineering & Technology, 2009. 1-4.
- [17] Sizov V, Cherniakov M, Antoniou M. Forward scattering radar power budget analysis for ground targets [J]. IET Radar Sonar Navigation, 2007, 1: 437-446.
- [18] 胡程. 短基线前向散射雷达系统理论与信号处理方法研究[D]. 北京: 北京理工大学信息与电子学院, 2009. Hu Cheng. Research on system theory and signal processing method in short baseline forward scattering radar [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, School of Information and Electronics, 2009. (in Chinese)
- [19] HU Cheng, LONG Teng, ZENG Tao, et al. Physical modeling and spectrum spread analysis of surface clutter in forward scattering radar, Science China-Information Sciences, 2010, 53(11): 2310-2322.
- [20] Billingsley J B, Farina A, Gini F, et al. Impact of experimentally measured Doppler spectrum of ground clutter cancellation on MTI and STAP [C]. In Proceedings of 1997 International Radar Conference. Edinburgh, 1997. 290-294.
- [21] 王颖, 毛二可, 韩月秋. 相关 K 分布杂波的建模与仿真 [J]. 信号处理, 1997, 13(2): 141-146. Wang Ying, Mao Erke, Han Yueqiu. Modeling and simulation of Correlated K-distributed clutter [J]. Signal Processing, 1997, 13(2): 141-146. (in Chinese)
- [22] 盛文, 焦晓丽. 雷达系统建模与仿真导论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [23] 张长隆. 杂波建模与仿真技术及其在雷达信号模拟器中的应用 [D]. 长沙: 国防科学技术大学电子科学与工程学院, 2004. Zhang Changlong. Modeling and simulation of radar clutter for radar signal simulator [D]. Changsha: School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, 2004. (in Chinese)
- [24] 吕雁, 史林, 杨万海. 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. LU Yan, SHI Lin, YANG Wan-hai. Modeling and Simulation of Coherent Correlation K-Distributed Radar Clutter Using SIRP [J]. Modern Radar, 2002, 24(2): 13-16. (in Chinese)
- [25] 杨俊岭, 吕韶昱, 万建伟. 一种新的相干 K 分布模型及其在海杂波仿真中的应用 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(2): 250-253, 260. YANG Jun-ling, LV Shao-yu, WAN Jian-wei. A new coherent K-distributed model and its application in sea-clutter simulation [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(2): 250-253, 260. (in Chinese)

#### 作者简介



胡程 (1981-) 男, 生于湖南岳阳, 副教授。2003 年 7 月本科毕业于国防科学技术大学电子工程系, 获工学学士学位。2009 年博士毕业于北京理工大学, 获工学博士学位, 并留校工作。主要研究方向包括单/双基地合成孔径雷达、GEO SAR、前向散射雷达信号处理等。E-mail: hucheng.bit@gmail.com



刘长江 (1990-) 男, 生于山东日照, 硕士研究生。2012 年毕业于北京理工大学信息与电子学院, 获工学学士学位, 并被保送本校读研。主要研究方向为前向散射雷达信号处理。E-mail: 695270420@qq.com



曾涛 (1971-) 男, 生于天津, 教授, 博士生导师。任北京理工大学雷达技术研究所实验室主任、航空学会电子专业委员会委员。分别于 1994 年和 1999 年获北京理工大学学士、博士学位。主要研究方向包括 SAR 成像技术和实时雷达信号处理。

E-mail: zengtao@bit.edu.cn



周超 (1987-) 男, 生于江苏扬州, 硕士研究生。2010 年毕业于苏州大学, 获工学学士学位, 并被保送苏州大学电子与信息学院攻读研究生。主要研究方向为前向散射雷达信号处理。

E-mail: 1378940680@qq.com