

# 垂直入射区雷达地面散射系数测量与特性研究

段锐<sup>1</sup>, 张海<sup>2</sup>, 陈祝明<sup>1</sup>, 成彬彬<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学电子工程学院 成都 611731; 2. 中国工程物理研究院电子工程研究所 四川 绵阳 621900)

**【摘要】**为研究垂直入射区大地回波的散射机理,用S和8 mm波段线性调频连续波雷达散射计测量了垂直入射时农田和沙地的散射系数,建立了与雷达工作频率、高度、天线方向图、波束入射角、地面粗糙度和介电常数等相关的垂直入射区地面回波数据库,给出了回波数据处理方法,推导了粗糙地面散射系数理论模型,并对实验数据进行了拟合。实验结果表明,测量的垂直入射地面散射系数与所给模型吻合,沙地散射系数比农田强2~3 dB,8 mm散射系数平均比S波段强18~20 dB。

**关键词** 实验; 雷达散射计; 散射系数; 地面回波; 垂直入射

中图分类号 TN95

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.03.009

## Radar Terrain Scattering Return Measurement and Characteristics Research in Vertical Incidence Region

DUAN Rui<sup>1</sup>, ZHANG Hai<sup>2</sup>, CHEN Zhu-ming<sup>1</sup>, and CHENG Bin-bin<sup>2</sup>

(1. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

2. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics Mianyang Sichuan 621900)

**Abstract** To study the scattering mechanism of radar terrain returned in vertical incidence region, an experimental program to measure the scattering coefficients of terrain including farmland and sand in vertical incidence region was carried out by using S and 8mm Linear Frequency Modulated Continuous Wave Radar scatterometers. A terrain scattering return database connected with radar frequency, altitude, antenna pattern, incidence angle, and the roughness and permittivity of ground surface was established. The return data processing approach is provided, the theoretical scattering model of rough terrain surface is derived, and then the measured data is fitted by the model. The experimental results show that the measured scattering coefficients agree with the given model, the radar cross section per unit area at vertical incidence of sand is 2~3dB larger than that of farmland, and the scattering coefficients at 8mm is 18~20dB larger than that at S frequency-band.

**Key words** experiment; radar altimeter; scattering coefficient; terrain return; vertical incidence

电磁波垂直入射时的地面能量辐射特性对雷达高度表设计和提高对各种地面的测高性能具有重要意义。雷达接收的地面回波主要来自于电磁波在地面的散射和反射过程。针对不同工作频率、天线方向图、雷达波形以及工作高度和地形等的雷达高度表的研究表明<sup>[1-2]</sup>:即使在电磁波垂直入射时,地面回波的大部分能量仍然是由散射现象产生的。因此,地面的微分散射截面积或散射系数 $\sigma$ 是研究垂直入射时地面回波散射特性的主要对象。

地面散射系数是雷达参数(入射角、频率、极化)和地面参数(粗糙度、介电常数)的复杂函数。国内外已有实验的入射角大都集中在 $10^\circ\sim 80^\circ$ ,而对垂直入射方向( $0^\circ\sim 10^\circ$ )的研究却很少。文献[1]通过实验

获得了大于 $10^\circ$ 的近垂直(near-vertical incidence)入射区的测量数据,然后通过数据拟合外推出 $10^\circ$ 以下的垂直入射区的地面散射特性。上世纪90年代,中国电波传播研究所在L和X波段对地面的散射特性进行了实验测量,从文献[3-4]公布的结果看:虽然其覆盖了 $0^\circ\sim 80^\circ$ 的入射范围,但是在垂直入射区的测量数据少,没有研究垂直入射区的地面回波特性。

2009年和2010年的11月~12月,本文利用研制的S和8 mm波段雷达散射计在我国西南地区成都平原进行了垂直入射区地面回波测量实验,建立了与雷达高度、频率、天线方向图、波束入射角、不同地形(翻耕农田和沙地)、地面粗糙度和介电常数等相关的垂直入射区地面散射数据库。实验结果表明,

收稿日期: 2011-04-01; 修回日期: 2011-06-30

基金项目: 国家自然科学基金与中国工程物理研究院联合基金(NSAF)(10776003)

作者简介: 段锐(1979-),男,博士,主要从事雷达信号处理与地面回波特性方面的研究。

垂直入射时, 农田散射系数 $\sigma^0$ 在S波段为-1.5 dB, 8 mm波为18 dB; 沙地散射系数 $\sigma^0$ 在S波段为2 dB, 8 mm波为20 dB。

## 1 实验与回波数据

### 1.1 外场实验

实验的S和8 mm雷达散射计为LFMCW体制, 每部散射计已经过系统非线性度校正和距离定标, 实验时利用标准金属球目标进行功率标定, 散射计的主要技术参数如表1所示。

表1 S和8 mm雷达散射计参数

雷达参数	雷达散射计	
	S波段	8 mm波段
调制波形	三角波	锯齿波
中心频率/GHz	2.6	35
扫频带宽/MHz	200	1
扫频周期/ms	2	4
3dB波束宽度/(°)	6.8	3.99
发射功率/dBm	$\geq 20$	$\geq 20$
接收机灵敏度/dBm	$\geq -80$	$\geq -80$
接收机动态范围/dBm	$\geq 50$	$\geq 50$



a. 测量系统



b. 吊车

图1 外场实验平台

测量系统由吊车、仪器桁架、雷达散射计和角度传感器组成。散射计的吊起高度满足天线远场条件, 波束入射角度范围为 $0^\circ \sim 10^\circ$ , 步进量为 $0.2^\circ$ , 精度为 $0.1^\circ$ 。一般需要在测量平台上安装机械伺服机构来满足实验对入射角度的控制要求, 虽然测量方便、效率高, 但实验平台笨重, 平台和场地建设、维护的成本高。为保证角度控制精度和降低成本, 项目组在测量平台上加装精密的角度传感器和牵引控制绳, 通过拉动牵引绳改变天线波束中心的指向,

同时传感器实时地将入射角度传回数据采集系统, 并利用其触发数据的采集, 外场实验平台如图1所示。

测量地面类型为无植被覆盖的翻耕农田和沙地, 如图2所示。翻耕农田场地的均方根高度约为2 cm, 沙地的层厚大于10 cm, 表面铺平, 且无石子和杂草。实验时间在2009年11月~12月和2010年11月~12月。2009年实验时成都地区的降雨量较少, 地面干燥, 平均地面温度为 $9^\circ\text{C}$ ; 而2010年实验时雨水充沛, 实地面较潮湿, 平均地面温度为 $11^\circ\text{C}$  [5]。对每种地面, 用散射计在不同的高度采集数据。



a. 沙地整体



b. 沙地局部



c. 农田整体



d. 农田局部

图2 外场实验场地

### 1.2 实验数据处理方法

实验采用相对标定法<sup>[5]</sup>的原理测量地面散射系数: 使用RCS已知的标准金属球作为定标体, 通过测量定标体与面目标的回波功率比计算地面散射系数为:

$$\sigma^0 = \frac{P_{\text{Terrain}}}{P_{\text{MtlBall}}} \left( \frac{R_{\text{Terrain}}}{R_{\text{Mtlball}}} \right)^4 \frac{\sigma_{\text{Mtlball}}}{A_{\text{ILL}}} \quad (1)$$

式中,  $P_{\text{Terrain}}$ 和 $P_{\text{Mtlball}}$ 分别为地面和定标体的回波功率;  $R_{\text{Terrain}}$ 为散射计到照射中心的距离;  $R_{\text{Mtlball}}$ 为散射计到金属球的距离;  $\sigma_{\text{Mtlball}}$ 为金属球RCS;  $A_{\text{ILL}}$ 为照射面积。同基于雷达方程计算 $\sigma^0$ 的绝对测量方法不同,  $\sigma^0$ 是地面和金属球的回波功率之比的函数, 因此不需要知道发射功率、天线增益等系统参数, 同时消除了系统相对误差对测量结果的影响。

$P_{\text{Terrain}}$ 和 $P_{\text{Mtlball}}$ 是接收回波信号的平均功率, 对接收机的差拍信号FFT分析后得到, 并通过数据加窗和增加FFT长度来减小栅栏效应的影响。回波信号带宽 $B_w$ 由地面照射的边界频率 $f_{\text{max}}$ 和 $f_{\text{min}}$ 得到, 则平均回波功率为:

$$P_T(B_w) = \frac{1}{B_w} \int_{f_{\text{min}}}^{f_{\text{max}}} P_d(f) df \quad (2)$$

式中,  $P_d(f)$ 为差拍信号的功率谱。由于地面是非光滑的, 雷达和散射单元间的相对位置变化会导致回波功率的起伏, 即产生衰落现象。因此, 在实验时, 对每个入射角度都采集了大量的数据样本, 处理时功率谱位于5%到95%置信区间内的数据样本。

按3 dB天线方向图宽度计算地面的照射面积 $A_{\text{ILL}}$ , 此时天线增益变化和照射区域外回波功率对测量结果的影响忽略不计。实验场地满足均匀性条件, 可假设照射区域内散射系数 $\sigma^0$ 是常数。

## 2 地面回波散射模型

### 2.1 地面回波的反射与散射模型

在垂直和近垂直入射区, 地面回波主要有两类: 一种是服从菲涅尔反射定律的镜面反射分量, 即相干反射分量, 其幅度和相位由位于平均高度面的散射体决定; 另一种是非相干的散射分量, 其幅度和相位由与平均高度面的高度差不同的散射体决定<sup>[1-2]</sup>。实验已表明<sup>[1]</sup>: 在垂直照射情况下, 散射计接收到的地面辐射的能量是由较多散射(非相干)信号和少量反射(相干)信号组成。为了确定回波中反射和散射分量的比例, 定义镜面反射衰减因子 $\chi$ , 它描述了粗糙面相对于光滑表面的反射能力, 表示为:

$$\chi = \exp \left[ -2 \left( \frac{2\pi\sigma_h}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中,  $\sigma_h$ 为散射体位置关于平均高度面的高度标准差;  $\lambda$ 为工作波长。考虑到地面的吸收和传输现象, 引入菲涅尔反射系数 $K$ , 则镜面反射回波功率为:

$$P_{\text{spec}} = \frac{\chi^2 K^2 P_t G^2(0) \lambda}{(4\pi)^2 (2h)^2} \quad (4)$$

式中,  $P_t$ 为发射功率;  $G$ 为天线增益;  $h$ 为雷达高度。减去反射功率后就得到回波的散射功率, 即:

$$P_{\text{scatt}} = (1 - \chi^2) \beta \int \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma^0}{(4\pi)^3 R^4} dA = \beta' \int \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma^0}{(4\pi)^3 R^4} dA \quad (5)$$

式中,  $\beta$ 为地面吸收与去极化因子<sup>[11-21]</sup>;  $\beta' = (1 - \chi^2) \beta$ ;  $R$ 为到面积元 $dA$ 的斜距。

同非垂直入射区域不同, 在垂直入射区, 实验数据测得的回波功率中既包含了地面的后向散射回波, 也包含了反射回波功率。若要计算功率反射系数, 必须先从回波功率中扣除后向散射回波功率部分, 但是这部分功率无法直接测量得到, 因此, 在实际处理中, 利用非垂直入射角度上的后向散射回波功率外推出垂直入射角度上的散射回波功率, 然后计算得到垂直入射区的功率反射系数为:

$$(\chi K)^2 = \frac{64\pi^2 h^2}{P_t G_{\perp}^2(0) \lambda^2} [P_r - P_{\text{scatt}}(0)] \quad (6)$$

式中,  $P_r$ 为平均接收功率。当 $\chi=1$ 时, 各种地面的典型 $K$ 值由文献[1]可知。

### 2.2 粗糙地面模型

通常采用统计方法来描述地面的粗糙程度, 本文使用文献[6-8]提出的二维正态分布模型来描述粗糙地面的统计特性, 表示为:

$$P(z, z_0, \xi) = \frac{1}{\sigma_h \sqrt{2\pi} [1 - \exp(-2\xi^2/a^2)]^2} \times \exp \left\{ -\frac{[z - z_0 \exp(-\xi^2/a^2)]^2}{2\sigma_h^2 [1 - \exp(-2\xi^2/a^2)]} \right\} \quad (7)$$

式中,  $z$ 和 $z_0$ 分别为地面上相距 $\xi$ 的两点的高度;  $\sigma_h$ 为地面的高度标准偏差;  $a$ 为地面的相关长度, 其自相关函数具有高斯函数的形式<sup>[9]</sup>:

$$\rho(\xi) = \exp(-\xi^2/a^2) \quad (8)$$

利用上述统计和相关模型可算出雷达的回波功率为:

$$P_{\text{rs}} = \mu f(\theta) \quad f(\theta) = \frac{a^2}{4\sigma_h^2} \csc \theta \exp \left( -\frac{a^2}{4\sigma_h^2} \tan^2 \theta \right) \quad (9)$$

式中,  $\mu$ 为与雷达系统参数相关的常数;  $f(\theta)$ 描述了地面散射系数的变化特征。文献[10]对式(9)修正后, 得到随入射角度变化的地面散射系数模型为:

$$\sigma^0(\theta) = \frac{\theta a^2}{4\sigma_h^2} \csc\theta \exp\left(-\frac{a^2}{4\sigma_h^2} \tan^2\theta\right) \quad (10)$$

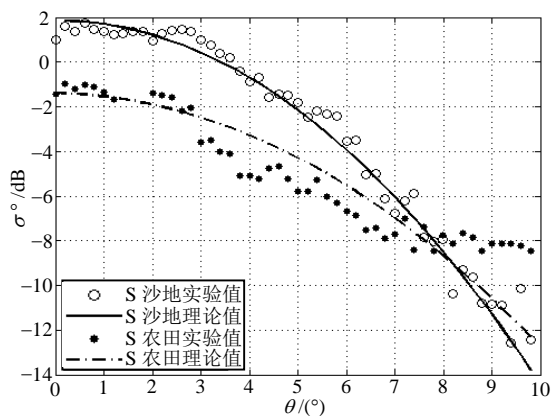
文献[1]证明该模型在近垂直入射区与实验测量结果相吻合, 并利用其外推出垂直入射区的散射系数。但是, 式(10)没有反映出波长、地面介电常数、吸收和去极化现象对散射系数变化规律的影响, 因此将其修正为:

$$\sigma^0(\theta) = \zeta(\lambda, \chi K, \beta) \frac{\theta a^2}{4\sigma_h^2} \csc\theta \exp\left(-\frac{a^2}{4\sigma_h^2} \tan^2\theta\right) \quad (11)$$

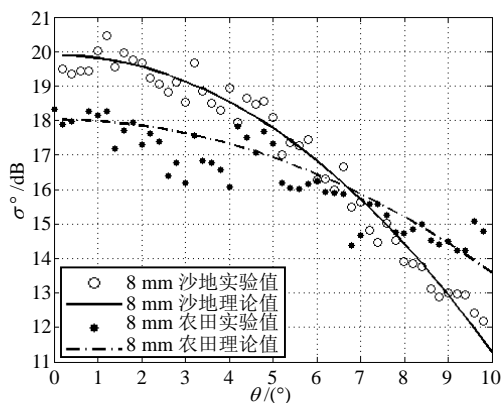
式中,  $\zeta(\lambda, \chi K, \beta)$ 为波长、介电常数、地面吸收和去极化现象的函数。

### 3 数据测量与拟合

外场实验采集了垂直入射区( $0^\circ \sim 10^\circ$ )范围内沙地、农田的回波数据, 使用相对法得到地面散射系数 $\sigma^0$ 与入射角 $\theta$ 的关系曲线, 并根据式(11)描述模型对实验数据进行拟合与验证。



a. S波

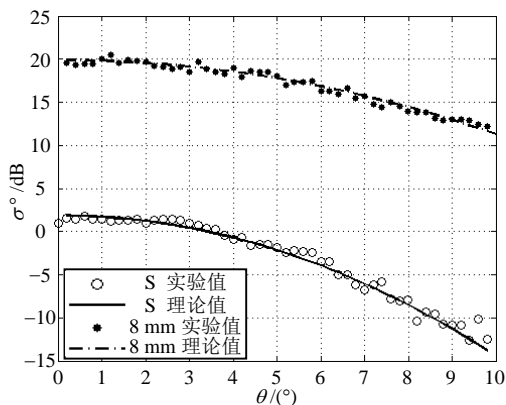


b. 8 mm

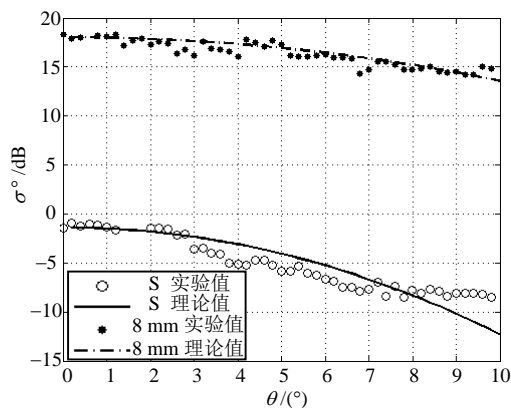
图3 不同地面的散射系数随入射角度的变化规律

由于各种地面具有不同的粗糙度、介电常数和去极化特性, 因此散射系数与地面类型相关。根据图3的沙地和农田散射系数曲线可知: 在小入射角度上, S和8 mm波的沙地散射系数均大于农田的散射系数, 其值约为4 dB, 这是由于沙地较农田光滑, 沙地的后向散射回波比农田强; 在入射角大于 $8^\circ$ 后农田散射系数的变化减缓, 而沙地散射系数随入射角增加下降得更快, 从菲涅尔反射现象解释: 沙地比农田光滑, 随着角度增大其镜面回波分量大部分被反射到其他方向, 仅有少量被散射计接收到; 而农田粗糙, 其辐射的镜面分量较少, 因此散射计接收到的后向散射回波也比沙地上的多。

对于窄带信号, 电磁波在地面的穿透深度随着频率的增大而减小, 因此散射系数随着波长的增加而减小。图4为不同工作频率时地面散射系数随入射角度的变化规律。从图4可见, 在沙地上, 8 mm波的散射系数大于S波的散射系数, 在垂直方向上其值接近19 dB; 同样, 8 mm波农田散射系数也大于S波段农田散射系数, 在垂直方向上约为18 dB。



a. 沙地



b. 农田

图4 不同工作频率时地面散射系数随入射角度的变化规律

从图3和图4的实验数据拟合结果看: 垂直入射区地面散射系数分布规律基本符合理论模型。在小入射角度区域(约为 $\theta \leq 8^\circ$ ), 散射系数曲线与模型较为接近; 而在大入射角度, 受菲涅尔反射影响, 农田散射系数的下降变慢。此外, 回波衰落现象还受到地面粗糙程度影响, 总的来说, 沙地的散射系数起伏较农田小, 其拟合结果的均方误差小于农田。

## 4 结 论

本文介绍了使用S和8 mm波段雷达散射计测量垂直入射区地面散射系数的实验情况, 测量地面为沙地和农田; 推导了在电磁波垂直入射情况下描述粗糙地表散射系数的理论模型; 测量结果揭示了不同波段电磁波在不同粗糙程度表面上地面散射系数随入射角变化的规律。实验结果表明: 测量的垂直入射地面散射系数与所给模型吻合; 垂直入射时, 农田散射系数 $\sigma^\circ$ 在S波段为-1.5 dB, 8 mm波为18 dB; 沙地散射系数 $\sigma^\circ$ 在S波段为2 dB, 8 mm波为20 dB; 沙地散射系数平均比农田强2~3 dB, 8 mm散射系数平均比S波段强18~20 dB。

## 参 考 文 献

- [1] EDISON A R, MOORE R K, WARNER B D. Radar terrain return measured at near-vertical incidence[J]. IRE Transactions on Antennas and Propagation, 1960, 8(3): 246-254.
- [2] MOORE R K, WILLIAMS C S. Radar terrain return at near-vertical incidence[J]. IRE Proceedings, 1957, 45(2): 228-238.
- [3] 汤明. 裸地散射特性分析[J]. 电波科学学报, 1994, 9(4): 69-75.  
TANG Ming. An analysis of the backscattering from bare soil[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1994, 9(4): 69-75.
- [4] 康士峰, 罗贤云. 多波段地物微波后向散射特性分析[J]. 微波学报, 1999, 15(1): 50-57.  
KANG Shi-feng, LUO Xian-yun. Analysis of multiband microwave backscattering characteristics for terrain[J]. Journal of Microwaves, 1999, 15(1): 50-57.
- [5] RICHARD T L, PETER F B, SIVA P G. Coherent FM-CW millimeter-wave radar systems for radar cross section measurements[J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 1990, 39(1): 208-211.
- [6] SKOLNIK M I. Introduction to radar systems[M]. New York: McCraw-Hill Press, 2008.
- [7] H. Davis DAVIES H. The reflection of electromagnetic waves from a rough surface[J]. IEE Proceedings of Part III: Radio and Communication Engineering, 1954, 101(70): 209-214.
- [8] DAVIES H. The reflection of electromagnetic waves from a rough surface[J]. IEE Proceedings of Part IV: Institution Monographs, 1954, 101(7): 118.
- [9] SPETNER L M, DAVIES H. Discussions on the reflection of electromagnetic waves from a rough surface[J]. IEE Proceedings of Part C: Institution Monographs, 1954, 102(1): 148.
- [10] COOPER J A. Comparison of observed and calculated near-vertical radar ground return intensities and fading spectra[M]. Albuquerque: The University of New Mexico, 1958.

编 辑 税 红