

外场 RCS 测量多路径干扰抑制技术研究

张新好^{1,2}, 田进军¹, 洪韬¹, 宁焕生¹, 王振荣¹

(1. 北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191; 2. 中国人民解放军 94326 部队, 山东, 济南 250023)

摘要: 针对室外近地雷达横截面(RCS)测试场测量结果易受多路径干扰影响的问题,利用射线跟踪技术,综合考虑了信号直射、地面反射和刀边衍射 3 种因素,建立了单刀刃型障碍信号传输损耗预测模型,推导出了单刀刃型雷达栅信号传输衰落的数学表达式。结合某单位外场数据,对近地信号传输损耗预测模型进行了仿真分析,提出了一种新的单刀刃型雷达栅高度选取原则,根据优化结果进行了工程实现。实测结果证明了文中所述模型的实用性和有效性。

关键词: 外场 RCS 测量; 多路径干扰; 传输损耗模型; 刀刃型雷达栅

中图分类号: TN 98 文献标志码: A 文章编号: 1001-0645(2011)05-0598-05

Study of Multi-Path Interference Suppression in Outdoor RCS Measurement

ZHANG Xin-hao^{1,2}, TIAN Jin-jun¹, HONG Tao¹, NING Huan-sheng¹, WANG Zhen-rong¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Unit 94326 of the PLA, Ji'nan, Shandong 250023, China)

Abstract: To deal with the problem that the radar cross section (RCS) outdoor measurement result is vulnerable to the multi-path interference with low elevation, a radio propagation loss prediction model for outdoor RCS range is presented with the use of ray tracing technique. The direct signal, ground reflection signal and edge diffraction signal were considered in the presented model. The general expression of the path transmission attenuation with single knife edge fence was derived in detail. Numerical simulation and analysis was carried out by taking an outdoor range as an example, and the rule for selecting the key parameters of the radar fence was given. Based on the optimized result, the radar fence has been realized in engineering. Experimental results demonstrate the practicality and effectiveness of the proposed model.

Key words: outdoor radar cross section(RCS) measurement; multi-path interference; propagation loss model; knife-edge fence

室外全尺寸目标静态雷达横截面(radar cross section, RCS)测量是获取目标真实 RCS 值的重要手段^[1]。在室外静态 RCS 测试场中,测试天线和待测目标受自身体积、质量、架设成本、操作便捷性、测试环境、特别是目标架设安全性等因素的制约,二者的架设高度往往距离地面较近,测量结果易受多路径干扰的影响^[2-3]。

设置雷达栅是室外静态 RCS 测试场抑制多路径干扰的常用手段^[1,4],典型的应用如美国的 Tejon 室外测试场^[5],由于 RCS 测量对象和应用领域的特殊性,研究室外近地 RCS 测试场多路径干扰抑制技术的公开文献较少。刀刃型障碍模型常用于无线通信信号传播衰减问题的近似研究^[6-10],由于通信信号传播环境的复杂性,其传输损耗预测结果仍有较

收稿日期: 2010-09-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61079019);国家空管委资助项目(GKG200902021)

作者简介: 张新好(1968—),男,博士生, E-mail: xinhazhang@126.com;王振荣(1941—),男,教授,博士生导师。

大的误差^[11]. 室外 RCS 测试场的信号传输环境通常为规则、单一的平整场地,将雷达栅用刀刃型障碍近似,利用刀刃型障碍模型预测室外近地 RCS 测试场的信号传播衰减,可得到较高精度的预测结果.

为降低多路径干扰对室外近地 RCS 测试场测量结果的影响,作者在 Zhao Xiongwen 等^[9]研究的基础上,针对室外 RCS 测量实践中常用的单雷达栅方案,将单刀刃型障碍模型应用于室外场信号传播衰减预测,建立了室外场信号传播衰减的精确预测模型,推导出了待测目标处合成场强相对于自由空间场的衰减值与雷达栅高度、工作频率和地面反射因数等的关系式. 结合某单位外场,详细分析了地面反射和雷达栅刀边衍射对待测目标处合成场强的影响,提出了一种新的单刀刃型雷达栅高度选取原则.

1 单雷达栅多路径传播模型

如图 1 所示, A 为收发天线, T 为待测目标, C 为刀刃型雷达栅放置于收发天线与待测目标间的一点, h_A, h_T 和 h_C 分别为收发天线、待测目标和雷达栅相对于反射地面的高度,收发天线 A 与雷达栅放置点 C 的距离为 d_1 , C 与待测目标 T 的距离为 d_2 , ρ_{F1} 和 ρ_{F2} 分别为 d_1 和 d_2 区域地面的反射因数.

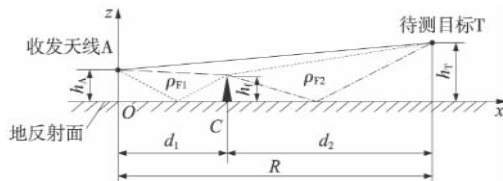


图 1 单雷达栅多路径传播示意图

Fig. 1 Geometry of multi-path propagation with single fence

在测试场地中放置一垂直于雷达视轴方向的刀刃型障碍时,待测目标 T 处接收到的电场相对于自由空间的衰减值(从待测目标返回接收天线的传播衰减,可根据互易定理给出)为^[9]

$$\hat{E}_T = \left(\frac{k}{2\pi i}\right)^{1/2} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2}\right)^{1/2} \int_{h_1}^{\infty} dz_1 \times \left\{ 1 + \rho_{F1} \exp\left[ik \frac{2(z_1 + h_A)h_A}{d_1}\right] \right\} \times [\exp(ikr_0) + \rho_{F2} \exp(ikr'_0)]. \quad (1)$$

式中:

$$r_0 = \frac{d_1 + d_2}{2d_1 d_2} \left[z_1 - \frac{d_1(h_T - h_A)}{d_1 + d_2} \right]^2; \quad (2)$$

$$r'_0 = \frac{d_1 + d_2}{2d_1 d_2} \left[z_1 + \frac{d_1(h_T - h_A)}{d_1 + d_2} \right]^2 +$$

$$\frac{2(z_1 + h_T)h_A}{d_2}; \quad (3)$$

$$h_1 = h_C - h_A; \quad (4)$$

$$R = d_1 + d_2; \quad (5)$$

k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$.

式(1)包含 4 种场分量:直射场,雷达栅衍射-地面反射场,地面反射-衍射场及地面反射-衍射-地面反射场. 其数学表达式分别为

$$\hat{E}_{T1} = \left(\frac{k}{2\pi i}\right)^{1/2} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2}\right)^{1/2} \int_{h_1}^{\infty} \exp(ikr_0) dz_1, \quad (6)$$

$$\hat{E}_{T2} = \left(\frac{k}{2\pi i}\right)^{1/2} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2}\right)^{1/2} \int_{h_1}^{\infty} \rho_{F2} \times \exp(ikr'_0) dz_1, \quad (7)$$

$$\hat{E}_{T3} = \left(\frac{k}{2\pi i}\right)^{1/2} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2}\right)^{1/2} \times \int_{h_1}^{\infty} \rho_{F1} \exp\left[ik \frac{2(z_1 + h_A)h_A}{d_1}\right] \exp(ikr_0) dz_1, \quad (8)$$

$$\hat{E}_{T4} = \left(\frac{k}{2\pi i}\right)^{1/2} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2}\right)^{1/2} \times \int_{h_1}^{\infty} \rho_{F1} \rho_{F2} \exp\left[ik \frac{2(z_1 + h_A)h_A}{d_1}\right] \exp(ikr'_0) dz_1. \quad (9)$$

以第 4 个分量为例,将式(2)(3)代入式(9),通过合并指数项,化简得

$$\frac{2(z_1 + h_A)h_A}{d_1} + \frac{d_1 + d_2}{2d_1 d_2} \left[z_1 + \frac{d_1(h_T - h_A)}{d_1 + d_2} \right]^2 + \frac{2(z_1 + h_T)h_A}{d_2} = \frac{d_1 + d_2}{2d_1 d_2} \left[z_1 + \frac{d_1(h_T - h_A)}{d_1 + d_2} + 2h_A \right]^2. \quad (10)$$

将式(10)代入式(9),并令

$$v = k \frac{d_1 + d_2}{2d_1 d_2}, \quad u = \left(\frac{k}{2\pi i}\right)^{1/2} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2}\right)^{1/2},$$

得

$$\hat{E}_{T4} = \rho_{F1} \rho_{F2} u \int_{h_1}^{\infty} dz_1 \times \exp\left\{iv \left[z_1 + \frac{d_1(h_T - h_A)}{d_1 + d_2} + 2h_A \right]^2\right\}. \quad (11)$$

同理可得其它 3 种场分量的数学表达式为

$$\hat{E}_{T1} = u \int_{h_1}^{\infty} \exp\left\{iv \left[z_1 - \frac{d_1(h_T - h_A)}{d_1 + d_2} \right]^2\right\} dz_1. \quad (12)$$

$$\hat{E}_{T2} = u \rho_{F2} \exp\left(ik \frac{2h_A h_T}{d_1 + d_2}\right) \times$$

$$\int_{h_1}^{\infty} \exp \left\{ i v \left[z_1 + \frac{d_1 (h_T + h_A)}{d_1 + d_2} \right]^2 \right\} dz_1. \quad (13)$$

$$\hat{E}_{T3} = u \rho_{F1} \exp \left[i k \left(\frac{2 h_A h_T}{d_1 + d_2} \right) \right] \int_{h_1}^{\infty} dz_1 \times \exp \left\{ i v \left[z_1 + \frac{2 d_2 h_A - d_1 (h_T - h_A)}{d_1 + d_2} \right]^2 \right\}. \quad (14)$$

可以看出,上述 4 种场分量中均包含有标准 Fresnel 积分,其近似计算结果可达极高的精度^[11-12]为

$$F_{\pm}(x) = \int_x^{\infty} \exp(\pm i t^2) dt. \quad (15)$$

式(11)~(14)相加即可得到待测目标处合成场强相对于自由空间场的衰减值,其大小由多个参数确定:雷达栅位置和高度、系统工作频率、待测目标的距离及地面反射因数等。

2 仿真分析

利用第 1 节推导得到的待测目标处合成场强相对于自由空间场衰减值的计算公式,结合某单位外场数据进行了仿真。仿真时的主要数据为 $h_A = 3.5 \text{ m}$, $d_1 = 402.5 \text{ m}$, 工作频率范围 $f = 9.950 \pm 0.350 \text{ GHz}$ 。

2.1 雷达栅高度对合成场强衰减值的影响

图 2(a)为 $d_2 = 402.5 \text{ m}$, $\rho_{F1} = \rho_{F2} = 1$ (为简化计算,假定地面反射因数为常数),工作频率 $f = 9.950 \text{ GHz}$,待测目标架设高度分别为 $h_T = 2.0, 3.5$ 和 5.0 m 时,接收点合成场强相对于自由空间场的衰减值随刀型雷达栅高度变化的关系曲线。显然,当接收点衰减值为 0 时的横坐标读数即为单刀型雷达栅的最佳高度 h_{f-opt} ,这即是单刀型雷达栅最佳高度的选取原则。从图中可以看出,对应工作频率 $f = 9.95 \text{ GHz}$, $h_{f-opt} = 1.6 \text{ m}$ 。在工程应用中,最优雷达栅高度值的选取,需综合考虑接收点高度(待测目标架设高度)、工作频率及目标距离等因素的影响。

图 2(b)为放置于场地中央的刀型雷达栅高度在最优值附近变化时,对待测目标处合成场强衰减值的影响,可以看出待测目标处合成场强衰减值的起伏范围,随待测目标架设高度的变化呈阻尼振荡衰减的趋势,待测目标架设高度越高,衰减起伏范围越小;在 2~5 m 的接收点高度范围内,当 $h_i < h_{f-opt}$ 时,雷达栅高度越低,衰减值的起伏范围越大,当 $h_i = 1.4 \text{ m}$ 时,观测区域内的衰减起伏范围达到最大,为 $-3.5 \sim +4.0 \text{ dB}$;当 $h_i > h_{f-opt}$ 时,雷达栅高度

越高,衰减起伏峰值随着待测目标架设高度的增加,表现出向下、向低处平移的特性。

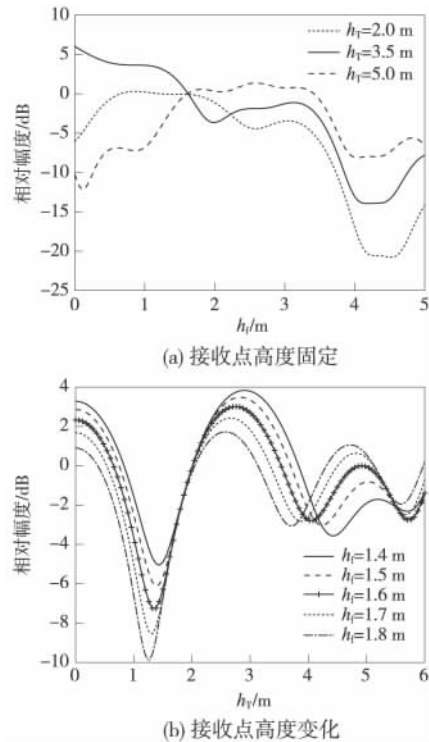


图 2 雷达栅高度对传输衰减值的影响(VV)
Fig. 2 Influence of the fence on the attenuation relative to free space for different heights of the receiver(VV)

2.2 工作频率对合成场强衰减值的影响

图 3 给出了雷达栅高度为最优值时,系统工作频率变化对待测目标处合成场强衰减值的影响,可以看出当频率变化范围较小时(带宽 700 MHz),观察区域内衰减值的峰值变化范围较小,大约为 0.5 dB。此外,从图中可以看出在收发天线与待测目标间放置一合适高度的刀型雷达栅,与不放置雷达栅相比较,可显著降低待测目标处合成场强衰减起伏范围,从而有效提高目标测量精度。

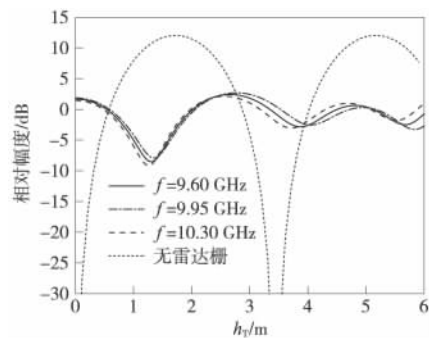


图 3 雷达栅、工作频率对衰减值的影响(VV)
Fig. 3 Influence of the fence and operating frequency on the attenuation relative to free space(VV)

2.3 地面反射因数对合成场强衰减值的影响

图 4 给出了地面反射因数变化对待测目标处合成场强衰减值的影响,可以看出雷达栅前后 2 个反射地面均对待测目标处合成场强衰减有影响,但两者的影响是不同的:雷达栅与待测目标间的反射地面对衰减的影响明显大于收发天线与雷达栅间的反射地面的影响.因此,为进一步改善测量精度,应重点对雷达栅与待测目标之间的反射地面进行处理.

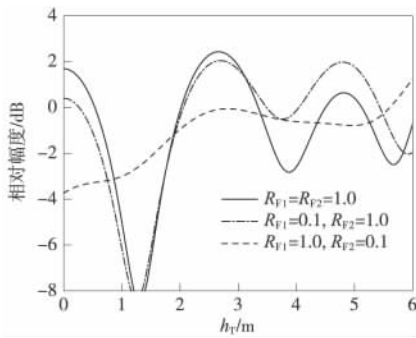


图 4 地面反射因数对衰减值的影响(VV)

Fig. 4 Influence of ground reflection factor on the attenuation relative to free space (VV)

3 外场实测结果分析

根据第 2 节的仿真结果,在某单位室外静态 RCS 测试场对刀刃型雷达栅进行了工程实现和验证测试,雷达栅视轴向横向宽度由 Fresnel 区确定^[4],刀刃型雷达栅的高度取 $h_{f-opt} = 1.6$ m(对应工作频率 9.95 GHz).

该室外静态 RCS 测试场的主要指标如下:测试系统为脉间频率步进体制,工作频率范围为 0.8~18.0 GHz,瞬时带宽为 700 MHz,对应 L,S,C,X 和 Ku 频段采用 5 套收发共用的抛物反射面天线,2 种极化方式 HH 和 VV;收发天线和待测目标间的距离 $R = 805$ m;收发天线中心距地面的高度 $h_A = 3.5$ m,拟测量目标的径向尺寸 ≤ 20 m,距反射地面的高度范围为 2~5 m.

验证试验通过对 -10 dBsm(9.95 GHz)定标球的一维成像测量,得到了待测目标区场的分布情况.定标球的支撑物为低密度泡沫柱,测量点选取以转台中心为目标区中心点($R = 805$ m),视轴向测量范围为 20 m,测量间隔为 2 m,定标球中心距地面的高度分别为 2.0,3.5 和 5.0 m,测试结果和模型预测结果对比见图 5.由图 5 可知,在预测近地 RCS 测试场信号传播衰减时,刀刃型障碍模

型预测结果与实测数据吻合较好,最大测量误差小于 1.5 dB,可满足外场目标 RCS 测量精度要求;当目标视轴向距离变化 ± 10 m 时,接收点合成场强衰减随距离的变化呈线性关系,3 种高度下的衰减最大变化范围均小于 1.0 dB.与高度向的合成场强衰减起伏相比,待测目标视轴向合成场强衰减的起伏较小.

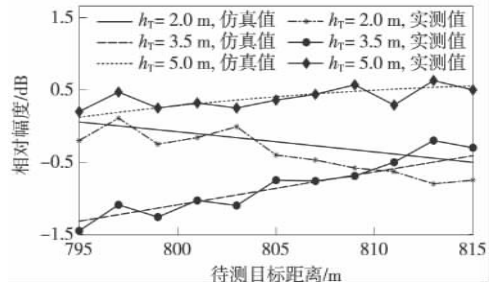


图 5 距离向不同高度接收点仿真和实测结果比较(VV)

Fig. 5 Attenuation relative to free space comparison between simulation and measurement for different range (VV)

图 6 为经软件和硬件距离门处理后,X 波段(9.95~10.65 GHz)加雷达栅和不加雷达栅时 -10 dBsm 球的一维像测量结果比较.从图 6 中可明显看出,不加雷达栅时的最大 RCS 测量误差达 10.16 dBsm($R = 805$ m, $h_r = 3.5$ m);在场地中央放置优化后的单刀刀刃型雷达栅($d_1 = d_2 = 402.5$ m),-10 dBsm 球的 RCS 测量值为 -10.32 dB,可满足 RCS 测量结果优于 ± 1.5 dB 的设计精度要求;此外,不加雷达栅时,目标区前后有较强的干扰,因距离目标太近,无法用距离门抑制,从而影响后续的目标二维成像结果.

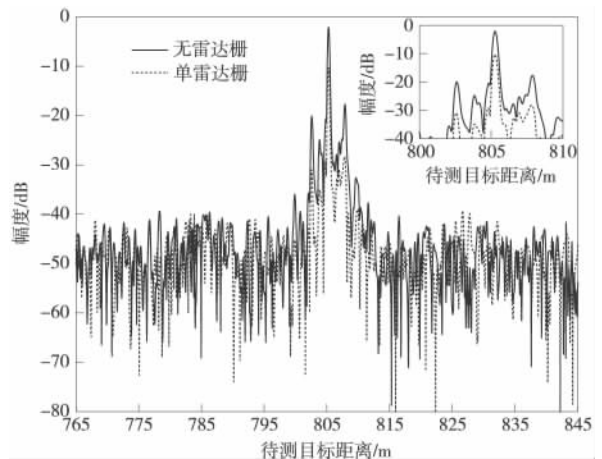


图 6 窄距离门 X 波段 -10 dBsm 球一维像对比

Fig. 6 Comparison of one-dimensional image of -10 dBsm sphere with narrow gate in X-band

4 结 论

针对制约外场静态目标 RCS 测量精度的多路径干扰问题,提出了一种新的单刀刃型雷达栅信号传输损耗预测模型,推导出了待测目标处合成场强相对于自由空间场的衰减值与雷达栅高度、工作频率和地面反射因数等的关系式,详细分析了地面反射和雷达栅刀边衍射对待测目标处合成场强的影响.仿真和实测结果表明,在室外近地 RCS 测试场中,通过设置合适高度的单雷达栅,可有效抑制多路径干扰对测量结果的影响,文中所述模型可满足外场静态目标 RCS 测量的工程应用需求,对室外近地测量实践有一定的指导意义.

参考文献:

- [1] 何国瑜, 卢才成, 洪家才, 等. 电磁散射的计算和测量[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006:423-431.
He Guoyu, Lu Caicheng, Hong Jiakai, et al. Calculation and measurement of electromagnetism scatter[M]. Beijing: Beihang University Press, 2006:423-431. (in Chinese)
- [2] 张瑜, 李玲玲. 低角雷达跟踪时的多路径散射模型[J]. 电波科学学报, 2004, 19(1):83-86.
Zhang Yu, Li Lingling. Multipath scattering model of low angle radar tracking[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(1):83-86. (in Chinese)
- [3] 段世忠, 周荫清, 张孟, 等. 主动雷达导引头多路径效应的数字仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(4):447-450.
Duan Shizhong, Zhou Yinqing, Zhang Meng, et al. Numerical simulation of multipath effect of active radar seeker[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(4):447-450. (in Chinese)
- [4] IEEE Antennas and Propagation Society. IEEE recommended practice for radar cross-section test procedures [S]. New York: Antenna Standards Committee, 2007: 6-19.
- [5] The Howland Company. Radar ranges of the Mojave desert[R/OL]. [2010-07-25]. <http://www.thehowlandcompany.com/RCS-ranges.htm#outdoor>.
- [6] Holm P D. Calculation of higher order diffracted fields for multiple-edge transition zone diffraction[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(5):1350-1355.
- [7] Vongsripeng P, Promwong S, Supanakoon P, et al. Ground reflection model in rough surface for UWB impulse radio [C] // IEEE International Symposium on Communications and Information Technology. Beijing, China:[s. n.], 2005:658-661.
- [8] Rao T R, Bhaskara S V, Prasad M V S N, et al. Single knife edge diffraction propagation studies over a hilly terrain [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1999, 45(1):20-29.
- [9] Zhao Xiongwen, Pertti V. Multipath propagation study combining terrain diffraction and reflection[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2001, 49(8):1204-1209.
- [10] Assis M S, Cerqueira J L. Diffraction by terrain irregularities: a review and new results[C]//Proceedings of The Second European Conference on Antenna and Propagation. Edinburgh, UK:[s. n.], 2007:1-6.
- [11] Xu Ying, Tan Qiwu, Erricolo D, et al. Fresnel-Kirchhoff integral for 2-D and 3-D path loss in outdoor urban environments[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(11):3757-3766.
- [12] Chang I L, Fuchs W H J, Hayman W K. Fresnel-integral approximation[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1995, 37(2):99-100.

(责任编辑:刘芳)