

地面平面场 RCS 测量异地定标误差分析

吴鹏飞* 许小剑

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

摘要: 地面平面场是用于进行全尺寸或缩比目标模型静态散射特性测量的室外场地。该文从地面平面场的特点入手,分析了在进行目标雷达散射截面(RCS)测量时,目标和定标体因受到测量环境影响而产生的定标误差。在简要阐述地面平面场中的异地定标技术的基础上,综合考虑地面反射和天线方向性两方面的因素,研究了定标体回波强度与放置位置的关系,分析了地面平面场与自由空间的定标之间的差异以及由此所带来的测量误差。最后,通过计算机仿真得到了异地定标误差随定标体测量距离、测量频率以及天线波束宽度的变化规律。通常情况下,定标体放置在靠近目标的位置有利于减小异地定标误差。

关键词: 雷达散射截面测量; 定标; 误差; 地面平面场; 多路径效应

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2012)01-0058-06

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.10065

Error Analysis of Relative Calibration for RCS Measurement on Ground Plane Range

Wu Peng-fei Xu Xiao-jian

(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Ground plane range is a kind of outdoor Radar Cross Section (RCS) test range used for static measurement of full-size or scaled targets. Starting from the characteristics of ground plane range, the impact of environments on targets and calibrators is analyzed during calibration in the RCS measurements. The error of relative calibration produced by the different illumination of target and calibrator is studied. The relative calibration technique used in ground plane range is to place the calibrator on a fixed and auxiliary pylon somewhere between the radar and the target under test. By considering the effect of ground reflection and antenna pattern, the relationship between the magnitude of echoes and the position of calibrator is discussed. According to the different distances between the calibrator and target, the difference between free space and ground plane range is studied and the error of relative calibration is calculated. Numerical simulation results are presented with useful conclusions. The relative calibration error varies with the position of calibrator, frequency and antenna beam width. In most case, set calibrator close to the target may keep the error under control.

Key words: Radar Cross Section (RCS) measurement; Calibration; Error; Ground plane range; Multipath effect

1 引言

全尺寸目标静态测量是测量目标雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)的方法之一,对目标散射特性的研究有十分重要的意义^[1]。全尺寸目标通常为大型目标,为满足远场条件,场地的纵向测量距离很大。但是目标的架设高度有限,所以目标容易受到地面反射波的影响^[2]。在对目标、雷达和地面特性进行合理的设计后,可以利用地面反射使目标上集中更多的能量。这种通过地面反射波来增加雷达系统增益的场地被称为地面平面场^[3]。由于测量目标

是大型目标,为了减少定标过程中定标体和目标交替安装的次数,地面平面场中通常用相对定标法进行定标,而且采用将定标体安放在独立支架上的异地定标技术,以降低定标过程的时间成本和操作复杂度^[4]。

在 IEEE 标准 1502-2007^[5]中,将影响 RCS 测量不确定度的因素分解为平均辐照度、系统漂移等 13 项误差,其中定标体的 RCS 不确定度是重要的因素之一。在考虑距离对于相对定标不确定度的影响时,也仅考虑了自由空间的情况。据作者所知,国内外文献中未见研究地面平面场条件下异地定标的误差问题。

本文主要研究在地面平面场中测量目标 RCS

2011-12-22 收到, 2012-04-09 改回, 2012-04-12 网络优先出版

*通信作者: 吴鹏飞 wupengfeibbi@sina.com

时, 由于异地定标产生的误差。首先分析了地面平面场的基本原理, 得到其基本特性, 然后推导出地面平面场异地定标的误差公式。最后进行计算机仿真, 研究异地定标误差受定标体测量距离、测量频率以及天线波束宽度等参数变化的影响, 并给出了分析结论。

2 地面平面场的基本原理

地面平面场的几何关系示意图如图 1 所示。

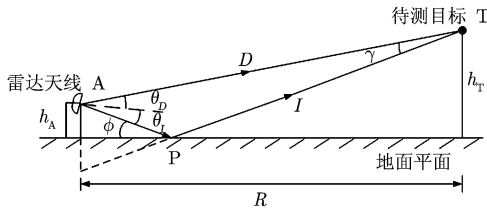


图 1 地面平面场几何关系示意图

A 为雷达天线所在的位置, T 为待测目标所在位置, P 为反射波在地面上的反射点。地面平面场中, 电磁波可以沿 4 条不同的路径传播, 分别为直接路径 ATA, 间接路径 APTPA, 双向路径 APTA 和 ATPA^[6]。根据几何关系, 路径 AT 的长度 D 为

$$D = \left[(h_T - h_A)^2 + R^2 \right]^{1/2} \approx R + \frac{(h_T - h_A)^2}{2R} \quad (1)$$

反射波路径 APT 的长度 I 为

$$I = \left[(h_T + h_A)^2 + R^2 \right]^{1/2} \approx R + \frac{(h_T + h_A)^2}{2R} \quad (2)$$

D 和 I 两者的路程差 δ 为

$$\delta = I - D \approx 2 \frac{h_A h_T}{R} \quad (3)$$

地面平面场中, 天线高度 h_A 和目标高度 h_T 均远小于测量距离 R 。所以在分析时采取以下 3 个原则:

(1) 忽略由于路程差导致不同路径电磁波在幅度上的衰减, 主要考虑路程差对相位造成的影响^[7]。

(2) 双站角 γ 很小, 在选用金属球作为定标体时, 忽略目标上直射波和反射波到达角的差异。

(3) 入射擦地角 ϕ 很小, 且通常 P 点附近的地面都经过人工处理, 所以假设地面的反射系数 $\rho = -1$ ^[8]。

为了简化对本问题的讨论, 先仅考虑幅度定标的情况。若 E_0 为自由空间中天线接收到距离 R 处的目标散射场强, E 为地面平面场中的场强, 则^[9]

$$E = E_0 \left| e^{-j2kD} + 2\rho e^{-jk(D+I)} + \rho^2 e^{-j2kI} \right| \quad (4)$$

式中 e^{-j2kD} 项是直接路径的回波; $2\rho e^{-jk(D+I)}$ 项是双向路径的回波, 由于两条双向路径刚好相反, 所以

乘以因子 2; $\rho^2 e^{-j2kI}$ 项是间接路径的回波, 由于这条路径两次照射到地面并反射, 所以乘以地面反射系数的平方。 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为雷达波长。

为了使地面反射波达到增强照射增益的效果, 各路径的相位保持一致, 需要满足

$$h_A h_T = m \frac{R\lambda}{4} \quad (5)$$

式中 m 为奇数, 即 $m = 1, 3, 5 \dots$ 。在地面平面场中, 通常取 $m = 1$ 。

在实际测量中, 由于所使用的天线具有很强的方向性, 这给地面不同距离处的场强分布带来了不可忽视的影响。假设天线的方向图是天线视线的一个旋转体图形。天线的方向性函数表示为 $f(\theta)$, θ 是偏离视线的角度。在式(4)中引入天线方向图的影响, 有

$$\frac{E}{E_0} = \left| f^2(\theta_D) e^{-j2kD} + 2f(\theta_D) f(\theta_I) \rho e^{-jk(D+I)} + f^2(\theta_I) \rho^2 e^{-j2kI} \right| \quad (6)$$

式中, θ_D 和 θ_I 分别表示直射路径和反射路径相对于天线视线的夹角。

本文中令目标在地面平面场中的回波功率 P 与自由空间的功率 P_0 比值为 K , 并称之为增益因子。其表示的是由地面平面场几何关系和天线方向性综合产生的回波功率的增益。根据式(3)、式(5)、式(6), K 为

$$K = \frac{P}{P_0} = \left(\frac{E}{E_0} \right)^2 = \left| f(\theta_D) + f(\theta_I) \right|^4 \quad (7)$$

3 地面平面场异地定标误差分析

3.1 异地定标原理

首先在不考虑地面反射的情况下, 对自由空间中异地定标的基本原理进行分析。异地定标几何关系示意图如图 2 所示。

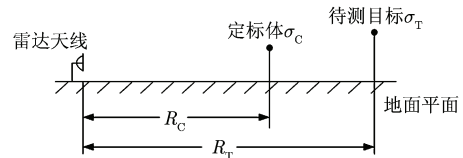


图 2 异地定标示意图

此时, 定标体和待测目标均满足雷达方程

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L} \cdot \sigma \quad (8)$$

若目标 RCS 为 σ_T , 定标体 RCS 为 σ_C , 则两者之间的关系为

$$\sigma_T = \frac{P_{rT}}{P_{rC}} \cdot \left(\frac{R_T}{R_C}\right)^4 \cdot \frac{L_T}{L_C} \cdot \sigma_C \quad (9)$$

式中 R_C 和 R_T 分别为定标体和待测目标的测量距离, P_{rC} 和 P_{rT} 分别为定标体和目标的接收功率, L_T/L_C 为系统传输损耗项。等号右侧的各个参数均可以通过计算或测量得到, 所以可以计算出目标的 RCS, 完成定标过程。

3.2 地面平面场中的异地定标

在地面平面场中, 因为存在地面反射路径, 所以目标实际测量的接收功率 P_{mT} 和自由空间内的接收功率 P_{rT} 满足

$$\frac{P_{mT}}{P_{rT}} = K_T \quad (10)$$

式中 K_T 为目标处由地面平面场几何关系和天线方向性综合产生的增益因子。

同理, 定标体实际测量的接收功率 P_{mC} 和自由空间内的接收功率 P_{rC} 满足

$$\frac{P_{mC}}{P_{rC}} = K_C \quad (11)$$

式中 K_C 为定标体处的增益因子。由于定标体和目标的放置位置不同, 所以通常定标体的增益因子 K_C 与目标的增益因子 K_T 不同。

根据式(9)、式(10)、式(11), 地面平面场中目标 RCS 与定标体 RCS 之间的关系为

$$\begin{aligned} \sigma_T &= \frac{P_{mT}/K_T}{P_{mC}/K_C} \cdot \left(\frac{R_T}{R_C}\right)^4 \cdot \frac{L_T}{L_C} \cdot \sigma_C \\ &= \frac{K_C}{K_T} \cdot \frac{P_{mT}}{P_{mC}} \cdot \left(\frac{R_T}{R_C}\right)^4 \cdot \frac{L_T}{L_C} \cdot \sigma_C \end{aligned} \quad (12)$$

式中 $\left(R_T/R_C\right)^4 \cdot \left(L_T/L_C\right)$ 是由于异地定标造成的传输误差, 在自由空间的异地定标中同样存在此误差项, 所以本文不对其做详细讨论, 将其视为已知量。 K_C/K_T 项是地面平面场中异地定标特有的误差, 是由于定标体和目标增益因子不同产生的, 也是本文进行误差分析的主要对象。

需要注意的是, 无论是待测目标还是定标体, 在安放时与天线的关系均要满足式(5), 以获得最好的测量效果。待测目标的测量距离 R_T 和高度 h_T 通常根据地面平面场的客观条件确定, 然后按照实际的测量频率(波长)确定天线高度。固定天线高度和测量频率后, 定标体的测量距离 R_C 和高度 h_C 的关系为

$$h_C = \frac{\lambda}{4h_A} \cdot R_C \quad (13)$$

对于不同的定标体测量距离 R_C (高度 h_C), 定标体的增益因子会有所变化。异地定标产生的增益因子误差也会随着定标体的测量距离变化。

3.3 宽带测量的定标误差

点频测量时, 一般把天线高度和目标高度调整在该频点上, 满足式(5)的地面平面场条件。宽带测量时, 一般把天线高度和目标高度调整在中心频率处。下面分析宽带测量时的定标误差问题, 点频测量的相位定标误差与宽带中心频率处的相位定标误差基本相同。

对于中心频率 f_0 , 带宽为 B 的宽带测量, 根据式(6), 回波信号可表示为

$$\begin{aligned} E &= E_0 \cdot e^{-j2kD} \cdot \left[f^2(\theta_D) + 2\rho f(\theta_D) f(\theta_I) e^{-jk(I-D)} \right. \\ &\quad \left. + \rho^2 f^2(\theta_I) e^{-j2k(I-D)} \right] \end{aligned} \quad (14)$$

当测量频率在 $[f_0 - B/2, f_0 + B/2]$ 内变化时, 会造成各传播路径回波相位的差异和天线方向图的改变。为了基本满足地面平面场条件, 要求宽带测量的相对带宽 B/f_0 不能过大。如果相对带宽较大, 需要将其分成若干个相对带宽较小的子波段分别测量^[4], 每个子波段对应不同的雷达天线高度。

根据式(14), 待测目标在测量频率为 f 时, 有

$$\begin{aligned} E_T &= E_{T0} \cdot \exp(-j2kD_T) \cdot \left[f^2(\theta_{DT}) \right. \\ &\quad \left. + 2f(\theta_{DT}) f(\theta_{IT}) e^{-j\phi} + f^2(\theta_{IT}) e^{-j2\phi} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

式中 $\phi = \frac{f - f_0}{f_0} \pi$, 下标 T 表示测目标时的参数。

令 $f^2(\theta_{DT}) + 2f(\theta_{DT}) f(\theta_{IT}) e^{-j\phi} + f^2(\theta_{IT}) e^{-j2\phi} = A_T \cdot \exp(-j\phi_T)$, 可得

$$E_T = E_{T0} \cdot A_T \cdot \exp(-j2kD_T) \cdot \exp(-j\phi_T) \quad (16)$$

相似地, 对于定标体, 有

$$E_C = E_{C0} \cdot A_C \cdot \exp(-j2kD_C) \cdot \exp(-j\phi_C) \quad (17)$$

式中 $A_C \cdot \exp(-j\phi_C) = f^2(\theta_{DC}) + 2f(\theta_{DC}) f(\theta_{IC}) e^{-j\phi} + f^2(\theta_{IC}) e^{-j2\phi}$, 下标 C 表示测定标体时的参数。此时, 异地定标误差为

$$\frac{K_C}{K_T} = \left(\frac{A_C}{A_T}\right)^2 \cdot \exp[-j4k(D_C - D_T)] \cdot \exp[-j2(\phi_C - \phi_T)] \quad (18)$$

当测量频率等于中心频率时, ϕ, ϕ_T, ϕ_C 恰好均为 0。此时相位定标误差与自由空间中的相位定标误差一致, 为

$$\Delta_\phi = 4k(D_C - D_T) \approx 4k(R_C - R_T) \quad (19)$$

当测量频率在带宽内变化时, A_T, A_C, ϕ_T, ϕ_C 均随频率改变, 此时情况比较复杂, 限于篇幅不进行详细讨论。

4 计算机仿真分析

为了研究定标体增益因子 K_C 和误差 K_C/K_T 随

测量距离等参数的变化, 进行计算机仿真。仿真条件如下: 目标的测量距离 $R_T=2000\text{ m}$, 目标高度 $h_T=10\text{ m}$ 。天线的半功率点波束宽度 $\theta_{3\text{dB}}=1^\circ$, 天线方向性函数为 $f = \left(\cos\left(\frac{\pi w}{2}\right)\right) / (1-w^2)$, 其中 $w = 2(d/\lambda)\sin\theta$, d 是天线直径。

在此条件下, 首先对不同频率下不同定标体测量距离的增益因子和误差进行计算。图 3 所示为 S 波段(雷达频率 3 GHz)、C 波段(6 GHz)、X 波段(10 GHz)在距离 R_C 的范围从 500 m 至 2000 m 之间的 K_C 和 K_C/K_T 。其中 2000 m 处的定标体增益因子 K_C 就是待测目标的增益因子 K_T 。

通过图 3 可以看出, 随着定标体距离的增大, 增益因子逐渐增大, 误差逐渐趋向于 0。当测量频率较高时, 增益因子和误差随距离的变化不明显。例如, 在 X 波段, 对于 500 m 至 2000 m 的定标体距离范围内, 误差均不超过 0.4 dB, 超过 600 m 时, 误差小于 0.2 dB; 而在 S 波段, 定标体距离为 500 m 时, 误差可达 3.6 dB, 在超过 1200 m 时才可满足

0.2 dB 误差要求。但是在实际选取定标体放置位置时, 也不宜过分靠近目标, 以防止定标体对目标的遮挡等干扰效果增强, 影响测量精度。关于定标体对目标遮挡的影响, 在文献[4]中已有类似的研究, 此处不赘述。

图 4 所示为距离 R_C 为 700 m, 1000 m 和 1500 m 时的 3 个不同距离点, 频率在 3 GHz 至 15 GHz 之间增益因子和误差的变化。可以看出, 在同一测量距离下, K_C 随测量频率增大而增大。当定标体放置位置靠近目标放置位置时, 即定标体距离与目标距离差距不大时, 误差随频率的变化不明显。当定标体距离为 1500 m 时, 对于 3 GHz 至 15 GHz 的频率段, 误差在 0.05 dB 以内。

将测量频率固定为 3 GHz, 研究增益因子和误差随天线波束宽度的变化。图 5 所示为距离 R_C 为 700 m, 1000 m 和 1500 m 时的 3 个不同距离点, 天线的波束宽度 $\theta_{3\text{dB}}$ 在 0.8° 至 2° 之间增益因子和误差的变化。

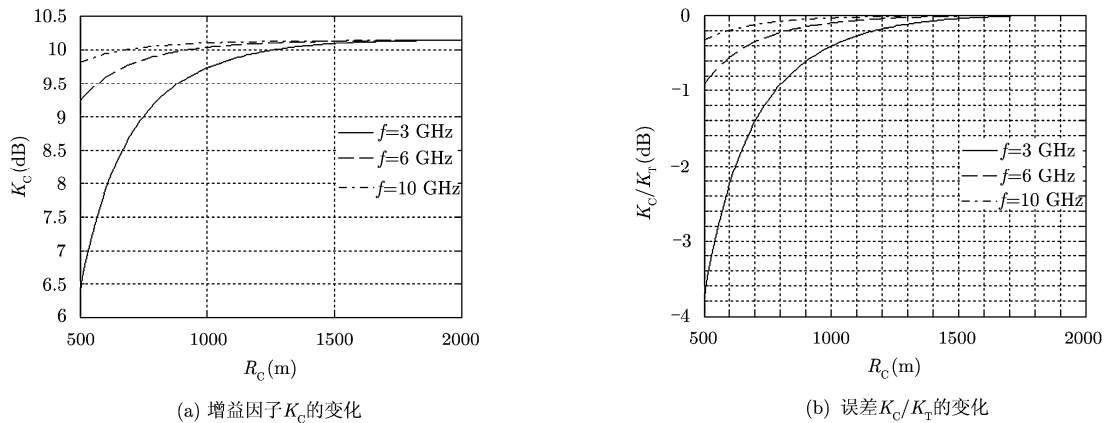


图 3 不同频率下定标参数随距离的变化

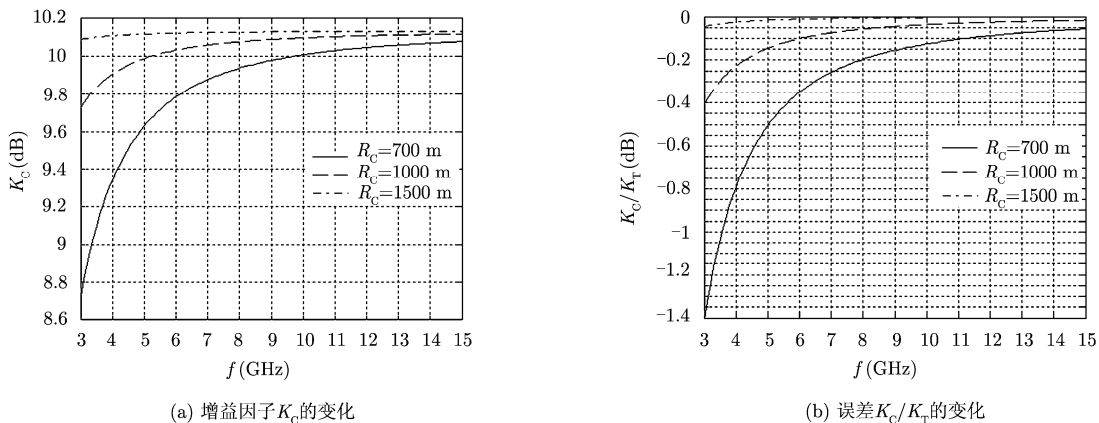


图 4 不同测量距离下定标参数随频率的变化

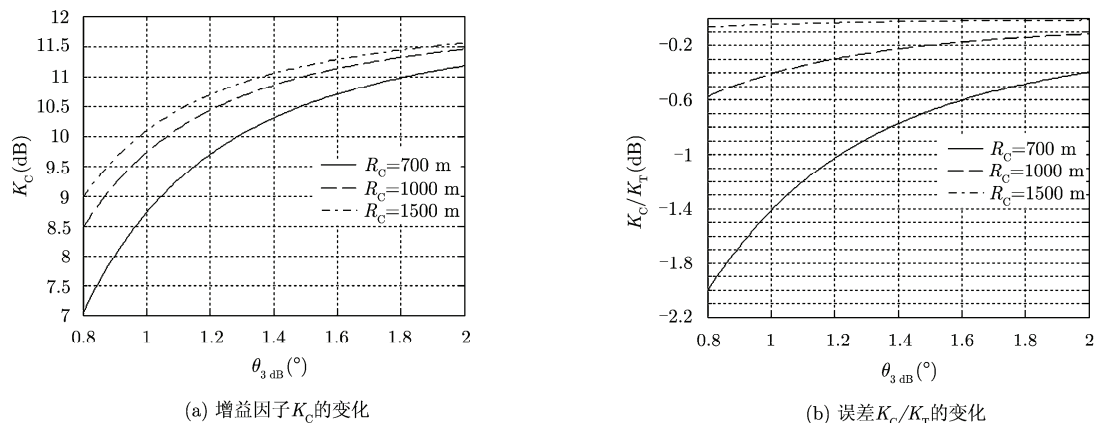


图 5 不同测量距离下定标参数随天线波束宽度的变化

通过图 5 可以看出, 随着天线波束宽度变宽, 增益因子逐渐增大。当定标体放置位置靠近目标放置位置时, 误差随波束宽度的变化不明显。但是改变天线波束宽度会影响到天线的固有增益, 即式(8)雷达方程中的 G , 从而影响到整体的定标增益, 所以在实际测量中要综合考虑各个方面的因素, 选取合适的天线波束宽度。

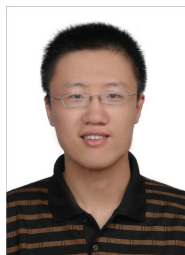
5 总结

本文主要研究地面平面场 RCS 测量过程中异地定标产生的误差。从地面反射和天线的方向性这两个地面平面场的主要特性入手, 研究了不同测量位置的增益因子的变化, 以此修正定标体 RCS 和目标 RCS 之间的换算关系, 并计算出放置在不同位置定标体与目标增益因子之间的差异所造成的定标误差。其结果可作为地面平面场的设计、建造和实际使用过程中定标距离等参数选择的基本依据。在宽带测量时, 定标误差随带宽内频率的变化仍需要进行更为详细的研究。

参 考 文 献

- [1] 赵国群, 朱峰, 刘丽娜, 等. 基于室外场 RCS 精确测量分析[J]. 现代电子技术, 2008, 31(11): 12-14.
Zhao Guo-qun, Zhu Feng, Liu Li-na, et al. RCS precision measurement analysis based on room outfield[J]. *Modern Electronics Technique*, 2008, 31(11): 12-14.
- [2] 刘俊, 刘峥, 刘韵佛. 米波雷达仰角和多径衰减系数联合估计算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(1): 33-37.

作 者 简 介



吴鹏飞(1988-), 男, 北京人, 北京工业大学学士学位, 北京航空航天大学在读硕士研究生。研究方向为雷达目标特性测量。

E-mail: wupengfeibi@sina.com



许小剑(1963-), 男, 江西万安人, 美国内布拉斯加大学博士学位, 北京航空航天大学教授, 博士生导师。主要研究领域为高分辨率雷达成像、遥感特征处理与识别、电磁散射与辐射建模等。

E-mail: xiaojianxu@buaa.edu.cn

- [3] Liu Jun, Liu Zheng, and Liu Yun-fo. Elevation angle and multipath fading coefficient joint estimation algorithm in VHF radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(1): 33-37.
- [4] 许小剑, 黄培康. 雷达系统及其信息处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 154-156.
Xu Xiao-jian and Huang Pei-kang. Radar Systems and Their Information Processing[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2010: 154-156.
- [5] Knott E F. Radar Cross Section Measurements[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993: 196-200.
- [6] IEEE Std 1502-2007[S]. IEEE Recommended Practice for Radar Cross-Section Test Procedures, 2007.
- [7] 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: 423-425.
He Guo-yu, Lu Cai-cheng, Hong Jia-cai, et al. The Calculation and Measurement of Electromagnetic Scattering[M]. Beijing: Beihang University Press, 2006: 423-425.
- [8] Knott E F, Shaeffer J F, and Tuley M T. Radar Cross Section [M]. Second Edition, Boston: Artech House, 1993: 493-495.
- [9] Zickgraf J H. Ground plane antenna range performance measured and calculated[C]. Antennas and Propagation Society International Symposium, June 1974: 47-50.
- [10] 杨世海, 胡卫东, 万建伟, 等. 多径反射下低空目标检测研究[J]. 电子与信息学报, 2002, 24(4): 492-498.
Yang Shi-hai, Hu Wei-dong, Wan Jian-wei, et al. Radar detection of low altitude target in multipath[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2002, 24(4): 492-498.