

地杂波雷达截面积模型性能对比分析

熊兴斌,王红,赵选峰,曲智国

(空军雷达学院,武汉 430019)

摘要:在推导雷达直视距离的基础上,分析比较了地杂波雷达截面积的经典模型与改进模型的性能曲线,实验证明,随着距离的增大两种模型之间具有较大区别。

关键词:地杂波;雷达截面积;模型

中图分类号:TN957.52

文献标识码:A

文章编号:CN32-1413(2007)01-0068-04

Comparison and Analysis of The Performance of Ground Clutter RCS Models

XIONG Xing-bin, WANG Hong, ZHAO Xuan-feng, QU Zhi-guo

(Air Force Radar Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: On the basis of deducing the horizon range of radar, the performance of classical and improved models of ground clutter radar cross section(RCS) are analyzed and compared in this paper. The experiment indicates that there is more difference between the two models along with the increase of range.

Key words: ground clutter; radar cross section; model

0 引言

现代飞行器性能的改进和导航手段的加强,使得低空和超低空飞行成为可能。地面对空情报雷达在探测这些低空飞行目标时,其部分波束必然要打到地面,由此就会产生极强的地物回波。对于以探测空中飞行物为目标的雷达来说,由地面所反射回来的不希望的回波称为地杂波。它会干扰雷达的正常工作并使得对有用回波的检测变得困难。特别是当杂波强度较强、分布较广时,就会在雷达显示器上造成混乱或覆盖,无法确认有用目标。因此,对于许多地面雷达来说,研究地杂波的性质就具有十分重要的意义。

我们可以用地杂波雷达横截面积 σ_c 来表征地面反射电磁波的能力,它是雷达波束和地面交截面的单位面积所等效的雷达横截面积。在各个方向上均等(各向同性)散射的地杂波截面积

σ_c 可表示为:

$$\sigma_c = \sigma^0 A_s \quad (1)$$

式中: σ^0 为后向散射系数; A_s 为雷达分辨单元面积。

因而,地杂波雷达截面积的确定包括后向散射系数 σ^0 和雷达分辨单元面积 A_s 两个因素的确定。

本文的推导基于如下2个前提:(1)雷达与波束擦地点之间不存在遮挡物;(2)在雷达探测范围内不存在距离模糊。

1 雷达直视距离 R_T 的推导

雷达的电磁波基本上是直线传播的,由于地球表面的弯曲,距离较远的目标是无法被发现的。图1为表征雷达直视距离与雷达天线架高、目标飞行器高度之间关系的几何图形,A点为天线阵面,C点为飞行目标,B点为AC连线与地

球的相切点, O 点为地心, h_r 为雷达天线的架设高度, h_t 为飞行目标的高度。若 h_r 、 h_t 一定, 雷达有一个极限的观察距离, 即雷达在地平线上的最大观察距离, 称为雷达的直视距离。若超过此距离, 电磁波将由于地球表面的阻挡而无法射向目标, 视线以下的区域称为隐蔽区, 又叫做雷达盲区。参照图 1, 可决定雷达的直视距离 R_T 为:

$$R_T = AB + BC \quad (2)$$

其中:

$$AB^2 = (R_e + h_r)^2 - R_e^2 = 2R_e h_r + h_r^2 \quad (3)$$

$$BC^2 = (R_e + h_t)^2 - R_e^2 = 2R_e h_t + h_t^2 \quad (4)$$

于是可得:

$$R_T = AB + BC = \sqrt{2R_e h_r + h_r^2} + \sqrt{2R_e h_t + h_t^2} \quad (5)$$

式中: R_e 为考虑大气折射影响后的等效地球半径, 其值为:

$$R_e = \frac{4}{3}R_a \quad (6)$$

式中: $R_a = 6371$ km, 为地球半径。

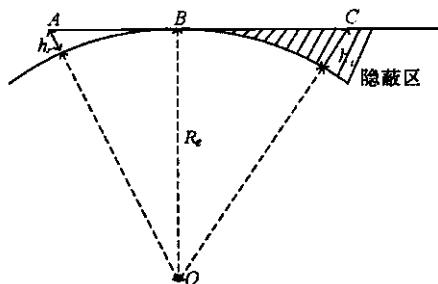


图 1 雷达直视距离几何图

假设我们取低空目标的飞行高度为 500 m, 可以得到 R_T 与 h_r 之间的变化曲线(如图 2)。

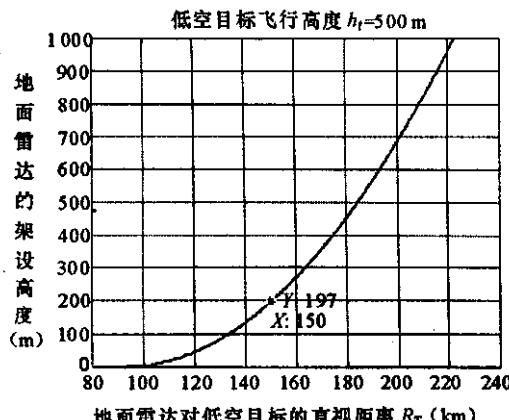


图 2 雷达作用距离与天线架设高度关系曲线

我们假设地面雷达对于低空 500 m 目标的探测距离要求为 150 km, 则由图 2 中的曲线可知其对雷达天线架设高度的要求为 197 m。为简便计, 我们取 h_r 为 200 m。这个条件对于地面雷达来说是很容易满足的, 只需将雷达架设在一定海拔高度的高山上即可。

2 地杂波雷达截面积模型的确定

2.1 经典模型

通常我们在考虑地杂波的后向散射系数时, 都会为了简化计算而把 σ^0 看作为一个不变的常数, 其值大约为 -30 dB。

地面雷达通常都是以低俯仰角工作的。此时经典的雷达地杂波分辨单元面积几何关系如图 3 所示, 其表达式为:

$$A_s = \frac{1}{2}c\tau R\theta_A \sec\theta_r \quad (7)$$

式中: c 为光速; τ 为脉冲宽度; R 为雷达至地杂波分辨单元的距离; θ_A 为雷达水平波束 3 dB 宽度; θ_r 为擦地角。

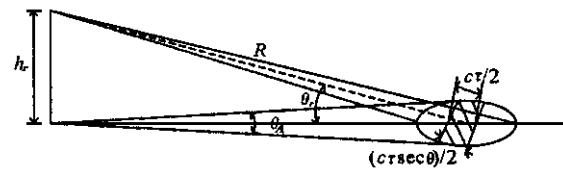


图 3 杂波分辨单元面积几何图

于是可得地面雷达地杂波雷达截面积的计算模型为:

$$\sigma_e = \sigma^0 A_s = \sigma^0 \cdot \frac{1}{2}c\tau R\theta_A \sec\theta_r \quad (8)$$

上述这种经典模型虽然简单方便, 但是它的局限性也是较多的。它没有反映出后向散射系数与地形、地貌、擦地角、雷达工作频率等因素的关系, 也没有考虑杂波分辨单元与地球曲率的关系, 而且它仅仅考虑了主瓣杂波, 因而是不准确的。

2.2 改进模型

实际上, 杂波后向散射系数 σ^0 的取值决定于地形、地貌、湿度、风向以及雷达辐射频率、功率等诸多因素。因此描述它的模型应该包括这些因素。目前考虑因素较全面的一种地杂波后

向散射系数模型为 $\gamma-f$ 模型。其表达式为：

$$\sigma^0 = \gamma a f^b \sin(\theta_r + c) \quad (9)$$

式中： θ_r 为擦地角或称为入射余角； f 为雷达工作频率，单位为 GHz； γ 为地面反射率表征参数；参数 a 和参数 b 是不同地形时雷达工作频率对地形的表征参数；参数 c 的引入是为了更精确地模拟实验数据，并防止在入射余角接近 0° 时用分贝表示的地杂波反射率急剧变为 $-\infty$ ，单位为度；其中 $a > 0$, $0 \leq b \leq 1$, $c > 0$ 。不同地形情况下的 γ 、 a 、 b 和 c 的数值如表 1 所示。

表 1 各种地类条件下的模型参数

地类	γ	a	b	$c/^\circ$
沙漠	0.1	0.08	0.75	0.50
农田	0.0316	0.18	0.60	0.55
丘陵	0.1	0.25	0.20	1.20
城市	0.316	0.35	0.18	0.70

取雷达工作频率 f 为 900 MHz，各种地类情况下杂波后向散射系数曲线如图 4 所示。

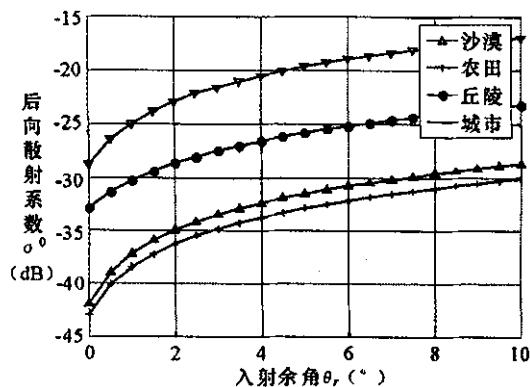


图 4 不同地形条件下后向散射系数曲线

经典地杂波雷达分辨单元面积 A_s 模型只考虑了主瓣杂波。事实上，在雷达的作用距离范围内，地杂波是由主瓣杂波和副瓣杂波组成的。在主波束所指向的前半球空间内，环绕着主波束存在多个副瓣波束。由于主波束的方向性很强，主瓣杂波主要是由主波束产生的；而副瓣杂波的产生则包括 2 种情况：一种是由副瓣波束打地的反射波从副瓣被接收机接收而产生，另一种是由主波束打地的反射波从副瓣被接收机接收而产生。垂直面内主、副瓣杂波的分布如图 5 所示。

雷达主、副瓣杂波的侧视、俯视图如图 6 所

示。图 6 中， θ_A 为水平波束 3 dB 宽度， θ_E 为垂直波束 3 dB 宽度，雷达架设高度为 h_r ，目标高度为 h_t ，目标斜距为 R ，距离分辨率为 $\Delta R = c\tau/2$ ，可以推得：

$$\theta_r = \arcsin\left(\frac{h_r}{R}\right) \quad (10)$$

$$\theta_e = \arcsin\left(\frac{h_t - h_r}{R}\right) \quad (11)$$

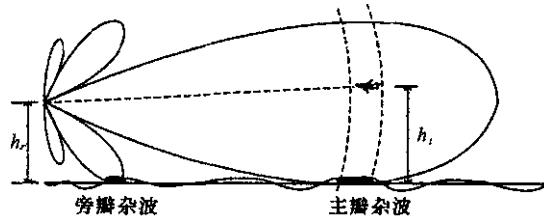


图 5 雷达主副瓣杂波几何图

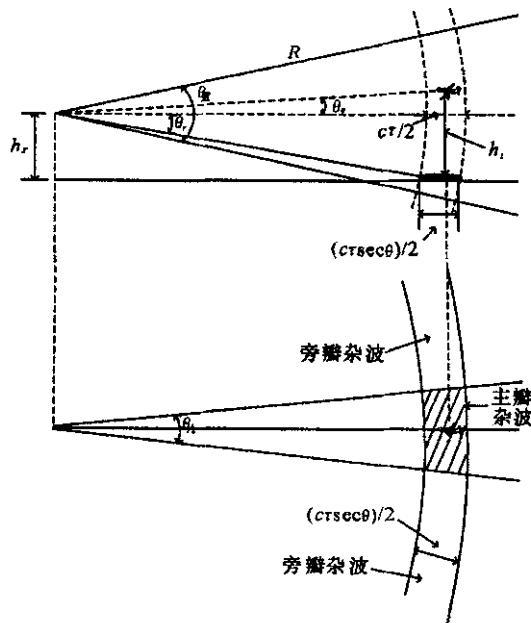


图 6 雷达主副瓣杂波几何图：侧视图、俯视图

雷达是以距离单元为单位来进行数据处理的，为此我们也以距离单元为单位来分析杂波。在同一距离分辨单元内的主瓣杂波面积和副瓣杂波面积分别记为 A_{MBc} 、 A_{SLc} 。主瓣杂波主要来自于主波束方向，而副瓣杂波则来自于主波束指向的前半球内的任一方向。由此可得：

$$A_{MBc} = \Delta R R \theta_A \sec \theta_r \quad (12)$$

$$A_{SLc} = \Delta R R \pi \sec \theta_r \quad (13)$$

假设天线波束方向图服从高斯型：

$$G(\theta) = \exp\left(-\frac{2.776\theta^2}{\theta_E^2}\right) \quad (14)$$

则我们可得主瓣杂波 RCS 为:

$$\begin{aligned} \sigma_{MBc} &= \sigma^0 A_{MBc} G^2 (\theta_e + \theta_r) \\ &= \sigma^0 \Delta R R \theta_A G^2 (\theta_e + \theta_r) \sec \theta_r \end{aligned} \quad (15)$$

副瓣杂波 RCS 为:

$$\begin{aligned} \sigma_{SLc} &= \sigma^0 A_{SLc} (SL_{rms})^2 \\ &= \sigma^0 \Delta R R \pi (SL_{rms})^2 \sec \theta_r \end{aligned} \quad (16)$$

式中: SL_{rms} 为天线副瓣电平均方根值; σ^0 由 $\gamma-f$ 模型确定。

若考虑杂波 RCS 随距离变化情况,即考虑大气折射效应和地球曲率效应,则杂波雷达截面积可由下式计算:

$$S_c(R) = \frac{S_{MBc} + S_{SLc}}{1 + (R/R_h)^4} \quad (17)$$

式中: $R_h = \sqrt{2R_e h_r + h_r^2}$ 为地面雷达天线与天线波束和地面切点之间的距离,此距离即为图 1 中的 AB。

3 实例计算

为简化计算,假设雷达的俯仰角为零,而且目标始终都处于雷达探测波束的中心,即 $\theta_e = 0$ 。

我们以丘陵地形条件下的后向散射系数为例来进行讨论。其他相关参数取为: $\theta_A = 3^\circ$, $\theta_E = 25^\circ$, $SL_{rms} = -30$ dB, $\tau = 1.5$ μ s, $f = 900$ MHz, $h_r = 200$ m。

根据以上参数,画出两种模型下杂波雷达截面积的对比曲线,如图 7 所示。

4 结束语

由两种模型下杂波雷达截面积的对比曲线可知:当距离较近时,两者之间的差别不是很大;但是随着距离的不断增大,两者之间的差别越来越明显,特别是当距离趋于雷达最大作用距离时,两者之间的差别达到最大。

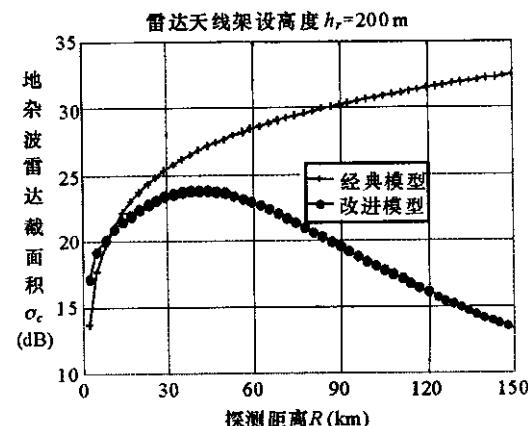


图 7 两种模型下杂波雷达截面积的对比曲线

它们最大的区别是:经典模型中杂波雷达截面积随着距离的增大而增大,它在雷达最大作用距离处取得最大值;而改进模型中随着距离的增大,杂波雷达截面积是先增大后减小,它在 41 km 左右取得最大值。这种变化趋势与我们在雷达显示器上看到的实际显示情况相符。

造成两种模型如此大区别的主要原因是经典模型没有考虑杂波 RCS 随距离变化的情况,即没有考虑大气折射效应和地球曲率效应对杂波 RCS 的影响。

参考文献

- [1] 尹以新. 雷达系统[M]. 武汉:解放军空军雷达学院, 2002.
- [2] [美]伊利·布鲁克纳. 雷达技术[M]. 薛绎译. 北京:国防工业出版社, 1984.
- [3] 尹自生. 雷达系统与抗干扰[M]. 武汉:解放军空军雷达学院, 1997.
- [4] 冯胜, 陈杰, 张娟, 涂序彦. 低入射余角下雷达地杂波反射率模型[J]. 火力与指挥控制, 2005, 30(2): 18-20.
- [5] Mahafza B R, Elsherbeni A Z. Matlab Simulations for Radar Systems Design[M]. CRC Press, 2004.

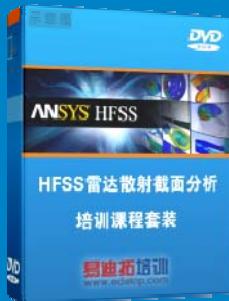
雷达散射截面（RCS）分析培训课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面（Radar Cross Section，简称 RCS）是雷达隐身技术中最关键的概念，也是电磁理论研究的重要课题，使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起，系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授，边操作边讲解，直观易学。

HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程，其中：《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程，帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用；《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面，包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义，实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程，专家讲授，从零讲起，直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

● 更多培训课程：

● **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

● **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

● **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>