

9-2-2020

Research of Radio Frequency Environment Algorithms for Radar System of System Combat Simulation

Xinjun Zhao

1. Beijing Special Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China;;2. Science and Technology on Complex Land Systems Simulation Laboratory, Beijing 100072, China;

Quanmin Wang

1. Beijing Special Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China;;2. Science and Technology on Complex Land Systems Simulation Laboratory, Beijing 100072, China;

Yongxian Zou

1. Beijing Special Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China;;

Yufei Jia

1. Beijing Special Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China;;2. Science and Technology on Complex Land Systems Simulation Laboratory, Beijing 100072, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Research of Radio Frequency Environment Algorithms for Radar System of System Combat Simulation

Abstract

Abstract: In weapons and equipment system of system simulation, radar systems are usually necessary composition. A complete radar combat system generally consists of radar models and electromagnetic (EM) environment models, and the reliability of simulation results was decided by these two elements. Despite of various radars, the EM environment simulation, especially radio frequency(RF) environment simulation, could be synthesized into a common and general purpose model, and support various radar simulation system. *Based on RF environment effects analysis and their algorithms, a synthesized RF environment effect model was proposed, which could provide calculation for RF radar simulation.* Two simulation examples involving atmosphere refraction model and clutter model were carried out and analyzed.

Keywords

Radio Frequency, Environment Effects Modeling, Radar System of System Combat Simulation, Synthesized Radio Frequency Environment

Recommended Citation

Zhao Xinjun, Wang Quanmin, Zou Yongxian, Jia Yufei. Research of Radio Frequency Environment Algorithms for Radar System of System Combat Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(1): 63-68.

雷达体系对抗射频环境仿真研究

赵新俊^{1,2}, 王全民^{1,2}, 邹永显¹, 贾宇飞^{1,2}

(1. 北京特种车辆研究所, 北京 100072; 2. 复杂地面系统仿真重点实验室, 北京 100072)

摘要: 在武器装备体系对抗仿真系统中, 雷达体系对抗仿真是必不可少的组成部分。完备的雷达体系对抗仿真既包括雷达系统模型, 也包括电磁环境模型, 仿真结果的可信度与这两个部分紧密相关。对抗体系中存在的不同雷达系统, 尽管其工作原理、性能参数各不相同, 电磁环境模型特别是射频环境的仿真模型可以设计为一个综合通用的模型, 为各雷达模型射频信号传播计算提供一致的支持。在分析射频信号传播过程以及射频环境效应的原理和算法的基础上, 建立了一个综合射频环境模型, 该模型能够为射频段雷达体系对抗仿真提供了一个综合、通用的仿真射频环境。通过具体仿真实例演示了模型的使用。

关键词: 射频; 环境效应建模; 雷达体系对抗仿真; 综合射频环境

中图分类号: TP 391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 01-0063-06

Research of Radio Frequency Environment Algorithms for Radar System of System Combat Simulation

Zhao Xinjun^{1,2}, Wang Quanmin^{1,2}, Zou Yongxian¹, Jia Yufei^{1,2}

(1. Beijing Special Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China;

2. Science and Technology on Complex Land Systems Simulation Laboratory, Beijing 100072, China)

Abstract: In weapons and equipment system of system simulation, radar systems are usually necessary composition. A complete radar combat system generally consists of radar models and electromagnetic (EM) environment models, and the reliability of simulation results was decided by these two elements. Despite of various radars, the EM environment simulation, especially radio frequency(RF) environment simulation, could be synthesized into a common and general purpose model, and support various radar simulation system. Based on RF environment effects analysis and their algorithms, a synthesized RF environment effect model was proposed, which could provide calculation for RF radar simulation. Two simulation examples involving atmosphere refraction model and clutter model were carried out and analyzed.

Keywords: Radio Frequency; Environment Effects Modeling; Radar System of System Combat Simulation; Synthesized Radio Frequency Environment;

引言

未来信息化战争的战场环境十分复杂, 现代的



作者简介: 赵新俊(1969-), 男, 陕西咸阳人, 博士, 高工, 研究方向为装备体系论证仿真; 王全民(1980-), 男, 山东费县人, 博士, 工程师, 研究方向为装备体系仿真, 射频环境仿真; 邹永显(1979-), 男, 山东即墨人, 工程师, 研究方向为车辆工程; 贾宇飞(1978-), 山西忻州人, 工程师, 研究方向新概念武器装备技术。
收稿日期: 2013-06-14 修回日期: 2014-03-25

电子战系统已从单个电子战设备朝着多平台、多手段、多功能的战区级综合电子战大系统方向发展, 雷达电子战也已经从一对一的设备间对抗发展到系统对系统、体系对体系的对抗。雷达体系对抗仿真系统的构建, 既包括雷达系统自身的建模与仿真, 也包括雷达电磁环境的建模与仿真。雷达设备的频段不同, 外部环境所施加的影响也不同。从高频段到毫米波段的频率范围统称为无线电频段, 也

称射频段。工作在射频段的雷达、干扰机等电子战设备所处的环境称为射频环境，射频环境对射频段电磁波传播的影响称为射频环境效应^[1]。尽管不同雷达系统的工作原理、性能参数各不相同，电磁环境的仿真，特别是雷达射频环境仿真，却可以综合为一个公共的通用的模型，为不同目的的雷达系统仿真提供计算支持。

本文主要研究外部环境对电磁波传播施加的影响，即射频效应，这些效应包括：杂波、多径、绕射等。对于这些效应的研究和实现，国内外有诸多文献可供参考^[2-6]，但多局限于单个效应。本文通过对射频环境效应的原理和算法进行讨论和分析，建立了一个综合射频环境模型，该模型能够为射频段雷达系统仿真提供了一个综合、通用的仿真射频环境。最后，通过具体仿真实例演示了模型的使用，仿真结果表明了其可行性和正确性。

1 雷达射频信号的传播过程

雷达系统通过发射信号并对回波信号接收处理来实现其探测、跟踪、预警等功能。如图 1 所示，在射频信号传播过程中，必然会受到外部自然环境的影响，这些影响包括由地面引起的杂波和多径，由地球曲率或山峰引起的绕射，以及由大气条件导致的折射和吸收（能量衰减）。同时，由目标引起的回波信号、由干扰源发射的干扰信号，以及其他雷达发射的信号，都可能会被雷达系统接收，对其信号处理过程和结果产生影响。因此，雷达仿真系

统包括雷达系统的模型，环境模型，目标模型和信号源模型等，如图 2 所示。

可以从两种角度来理解射频环境的概念，并能够得到 2 个方面的启发。(1) 从接收机的角度看，来自自然环境、目标、信号源的电磁波信号到达雷达接收系统后，雷达不能够区分这些信号的来源，所有这些信号都是外部射频电磁波环境的一部分，对这些信号都采取一致的处理方式。(2) 从外部环境的角度看，实体产生效应，环境中的任何电磁信号都是由某种实体引起的，射频环境是这种实体的集合，把环境分解成多个对象，如地面单元、传播介质（主要指大气）、目标、信号源（干扰机或其他雷达），分别对这些对象产生或反射的信号计算，综合之后就可以得到雷达应该接收的回波信号。

从第一个方面出发，可以为所有雷达模型设计采用统一的信号发射/接收接口，从而可在仿真中对所有雷达实体进行一致的操作^[4]。从第二个方面出发，可在仿真过程中对环境中的各种效应分别进行计算得到各回波信号分量，最后各分量叠加得到总的回波信号。下面分别对外部环境产生的射频效应模型进行分析。

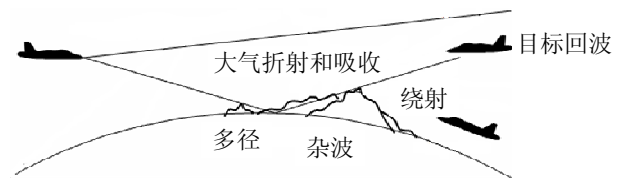


图 1 射频信号在传播过程中受到的影响

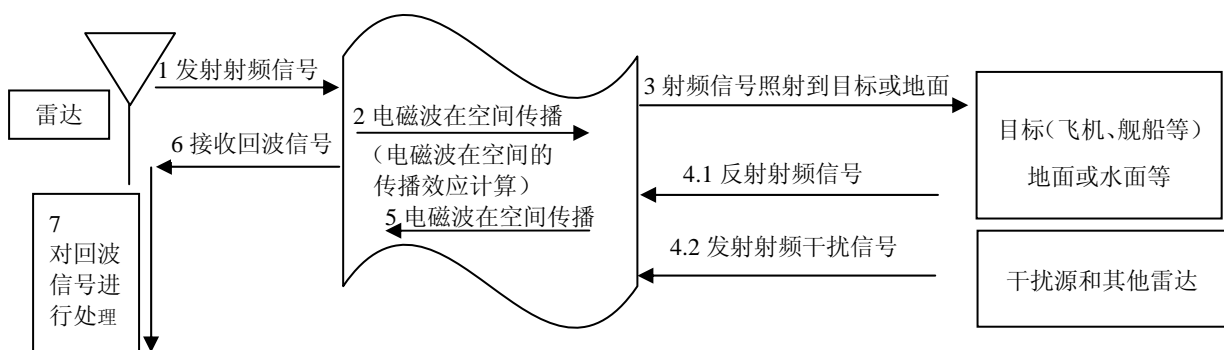


图 2 雷达系统中回波信号的来源

2 杂波模型

杂波是存在于雷达回波中的无用信号, 由被测目标背景中的无数小散射体的回波引起^[1-2,6]。在对杂波性质的研究中, 用后向散射系数 σ 来表示单位面积的平均雷达截面。这是一个与功率对应的归一化的值或平均值, 杂波的雷达截面等于后向散射系数乘以相应的面积。定义复后向散射系数为 γ , 则有:

$$\gamma = \sqrt{\sigma} e^{j\phi} = \sqrt{\sigma} (\cos \phi + j \sin \phi) \quad (1)$$

其中: ϕ 表示信号被反射时的相移; γ 表示电压的反射系数, 包含振幅和相位。相位 ϕ 符合均匀随机过程^[7]。幅值的平方 σ 是具有一定功率谱密度和幅度分布的随机过程^[10-11], 对它的计算包括: 模型参数 (幅度分布参数和功率谱密度参数) 的确定和随机数产生。本文选择 Weibull^[8-11] 分布对 σ 进行描述。概率密度函数^[11]:

$$f(x) = (x/q)^{p-1} (p/q) \exp[-(x/q)^p], \quad x \geq 0 \quad (2)$$

其中: x 为杂波的幅值; p 是形状参数; q 是尺度参数。

文献[9-10, 12]对杂波的分布特性和功率谱特性做了大量的测量和验证工作, 并给出了 Weibull 分布模型在不同环境中的参数。随机数产生算法目前主要有两种: ZMNL^[11]方法和 SIRP^[13]方法。由于 ZMNL 方法计算量小, 容易实现, 适用于对仿真速度要求较高的场合^[14]。通过上述方法得到了 σ 和 ϕ 的随机序列之后, 利用公式 (1) 即可计算得到地面分辨率单元的杂波。

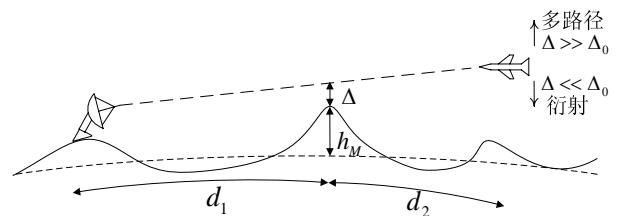
3 多径效应和绕射效应模型

多径是指雷达发射的电磁波到达目标的路径不止一条, 包括一条直射路径和一条或多条由地面反射路径^[3,6]。绕射是指电磁波传播到遮蔽区的现象, 是由波束传播路径上的障碍物引起的。根据障碍物的不同, 绕射又分为球形地球绕射和刃锋绕射^[6]。前者由地球的曲率引起, 用来表示波束照射到地平面以下的现象; 后者由山峰、建筑物等有尖锐边缘 (与波长相比) 的物体所引起。

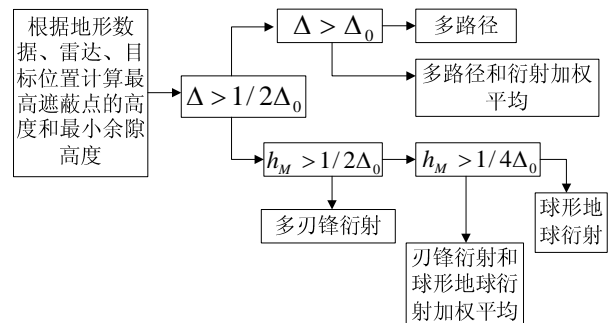
由于这 2 种效应都是由地球形状和地表起伏决定的, 且从算法实现的角度考虑, 多径效应和绕射效应是此消彼长的关系, 对于一个确定位置目标的一次计算中, 只有 3 种情况: 计算多径 (干涉区), 计算绕射 (绕射区), 两者加权 (中间区), 因此把这 2 种效应放到一起考虑。

SEKE (球形地球刃锋绕射) 算法^[5]是多径和绕射效应的综合算法。SEKE 算法使用林肯实验室的几何光学算法 (GOPT 和 GEOSE)、低海拔传播球形地球算法 (LAPSE) 和多刃锋绕射算法 (KEDEY) 来计算多径、球形地球绕射和多刃锋绕射等损失^[5]。SEKE 算法通过对地形、天线高度、目标高度和频率进行分析, 从上述算法中选择出合适的算法。

图 3(a) 所示为 SEKE 算法多径和绕射效应示意图, 图 3(b) 为 SEKE 计算流程框图。根据雷达天线—目标之间的连线与地面之间的关系计算出最高遮蔽点高度 h_M 和最小余隙高度 Δ 。由算法得到天线的单程和双程复方向图传播因子既包含幅度信息也包含相位信息, 可用于单基地雷达的目标回波计算和收发分置雷达的直接信号传播的计算。



(a) SEKE 算法多径和绕射效应示意图



(b) SEKE 计算流程框图

图 3 SEKE 示意图及计算流程框图

4 大气效应

地球大气层中对流层和电离层对电磁波传播有重要影响,在雷达频段,除超视距雷达(工作于 HF 频段)外,对流层最为重要。本文仅是对对流层进行讨论,内容包括折射效应和吸收效应。

4.1 大气折射

电磁波在空气中传播时,其路径不是直线,而是一条曲线,这是因为传播媒介(即空气)的折射系数发生变化所致。对流层中,折射系数随高度的增加而减小,电磁波的速度在对流层上部比在对流层下部略高一点。因此大气中水平前进的波前逐渐向下倾斜,这意味着射线将成为向下弯曲的曲线而不是直线。

射线在大气中传播途径可以根据 Snell 定律来确定^[1]。把大气层用多层各自具有恒定折射系数的薄层大气表示,射线每经过一层,计算一次折射角,依次计算就可描述射线的传播路径。求这个路径的过程称为射线追踪。在假设大气分层并且其性质只随高度变化的前提下,文献[2]给出了雷达射线追踪的积分式:

$$R(h_1, \theta_0) = \int_0^{h_1} \frac{n(h)dh}{\sqrt{1 - \{(n_0 \cos \theta_0) / [h(h)(1 + h/r_0)]\}^2}} \quad (3)$$

式中: R 是电波传播的距离; θ_0 是电磁射线的初始方向; n_0 是地球表面($h=0$)的折射系数, r_0 是射线起点与地球中心的距离, h_1 是射线跟踪终点处距离地面的高度。

4.2 大气吸收

大气吸收是由对流层中的氧和水蒸气分子的量子力学谐振引起的。虽然按定义来说谐振只出现在某些特定频率,但气体粒子的碰撞使谐振谱线展宽成带。低层大气碰撞更频繁,使这种展宽大到足以把吸收带延伸到雷达的大多数常用频谱。因此,虽然氧气和水蒸气的谐振频率分别是 60 GHz 和 22.2 GHz,但在几乎所有的雷达带宽上都有吸收效应。

与吸收有关的大气参数是压力 p 、温度 T 和水蒸气密度 ρ 。给定这些参数,就可以计算指定频

率的吸收系数 γ 。电磁波从位置 r_1 传播到 r_2 , 其吸收总量是:

$$A = \int_{r_1}^{r_2} \gamma(r)dr = \int_{r_1}^{r_2} [\gamma_{O_2}(r) + \gamma_{H_2O}(r)]dr \quad (4)$$

γ 是某位置上氧气和水蒸气吸收的和,分别计算氧气和水蒸气的吸收系数 $\gamma_{O_2}(r)$ 和 $\gamma_{H_2O}(r)$, 然后相加得到。

氧气的吸收系数最初由文献[16]提出,文中定义了谐振线的展宽形状公式,文献[15]改进了谱线宽度对高度的依赖关系,并将其公式化。水蒸气吸收的谐振线展宽形状也可使用与氧气同样的公式。文献[3]总结了这些研究成果,并对其进行了详尽的讨论。

5 基于综合射频环境模型的雷达对抗仿真

在雷达对抗仿真系统中,射频环境被分成两个部分(如图 4 所示):提供环境数据的环境服务和计算射频效应的地面射频效应模型。环境服务主要指地形服务,为地形信息查询提供函数调用,如地形高度和地表植被信息。各雷达模型、导引头、干扰机和目标模型通过特定的接口与射频效应模型交换信号。

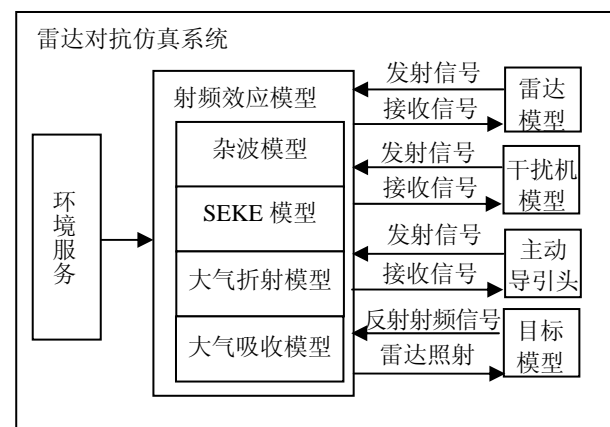


图 4 雷达对抗仿真系统框图

当雷达模型发射信号时,信号被放入一个称为射频信号包^[14]的对象中并发送给射频效应模型;射频效应模型读取环境数据并计算信号的传播路径,如图 5 所示。通过调用环境效应算法,得到雷达应

该接收到的来自环境和目标的回波信号, 包括杂波、多径信号和目标回波信号, 然后射频环境模型将这些信号发送给相应的接收机。对于所有的回波信号, 回波延迟、多普勒频率和相位信息都得到了计算。

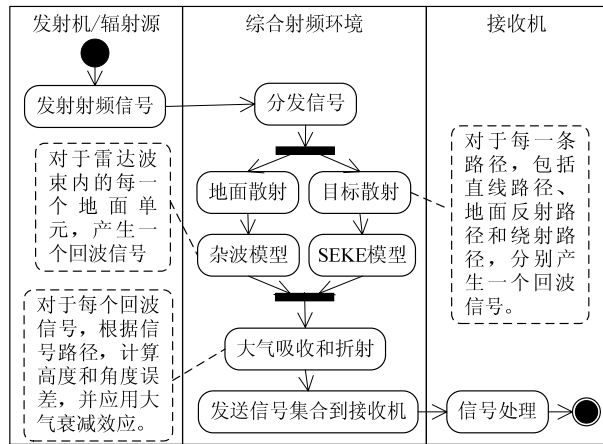


图 5 雷达仿真系统的信号流

6 仿真示例

本节通过 2 个例子演示射频环境模型中大气折射和杂波的使用, 第 1 个例子仿真由大气折射所引起的目标距离和角度误差, 第 2 个例子仿真雷达站点附近的杂波图。2 个例子使用的雷达和环境模型设置见表格 1。

表 1 示例仿真参数设置

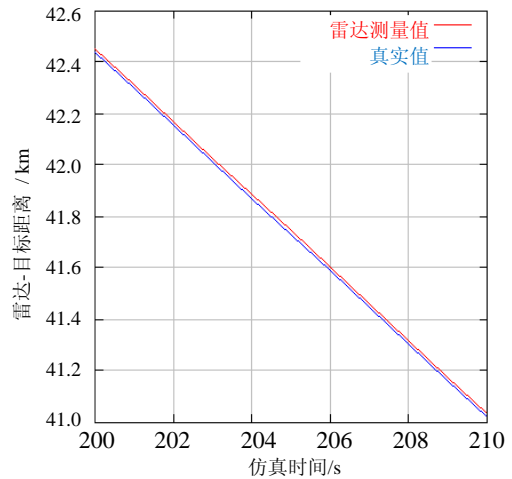
雷达参数	取值	环境参数	取值
频率	9.3GHz (X band)	地面类型	5
扫描速度	2 °/s	风速	10 km/hr
脉冲宽度	1 μs	经度范围	E99-E100
极化方式	HH	纬度范围	N34-N36
PRF	1 000 Hz		
俯仰角波束宽度	75°		
方位角波束宽度	1°		
雷达位置	(N35, E99.6)		

6.1 大气折射

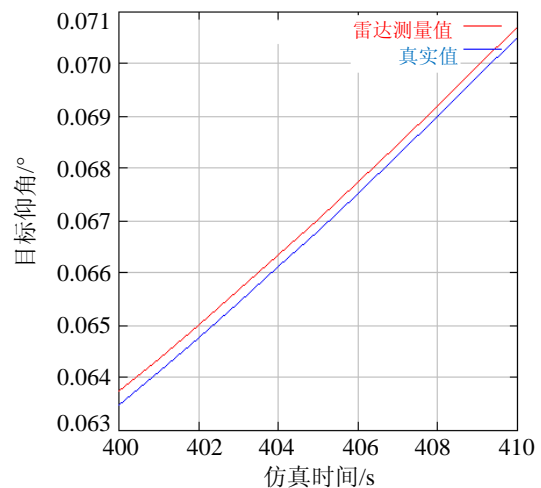
雷达对象固定置于经纬度坐标(N35, E99.6)处, 距地面高度 100 m, 飞机对象在初始时刻置于距 50km 处, 高度 1 000 m, 并以 200 m/s 的速度运动, 沿直线向雷达运动经过雷达上方后沿直线离开。

图 6 所示分别为雷达测量的飞机距离和仰角

与真实距离和仰角曲线的比较图, 由图中可知两者存在一定的偏差, 即雷达的测量误差, 此误差由大气折射引起。



(a) 目标到雷达距离



(b) 目标相对雷达的仰角

图 6 雷达测量值和真实值比较

6.2 杂波图

雷达天线绕其垂直轴作 360° 旋转, 指向保持水平, 即仰角始终为 0。雷达每隔 1 ms 发射一个脉冲信号, 并接收地面回波。雷达接收机的处理器使用间隔 150 m 范围 0~60 km 的距离波门来确定地面回波的距离 r ; 当前天线的方位角作为回波的到达角 θ 。

位于雷达极坐标系中 (r, θ) 处的距离单元被确定后, 其回波信号的功率可以从同相和正交分量得到。假设回波功率是 P_e , 信号的发射功率是 P_t ,

天线增益是 G_A ，后向散射系数是 σ^0 ，则有公式：

$$\sigma^0 = (4\pi)^2 r^4 \frac{P_e}{P_r} \frac{1}{\sqrt{A_c}} \quad (5)$$

其中： A_c 是距离单元 (r, θ) 的面积，由下式得到^[10]：

$$A_c = r \cdot \Delta r \cdot \Delta \theta \quad (6)$$

其中： Δr 是距离分辨率； $\Delta \theta$ 是方位角分辨率。

仿真结果如图 7 所示，图中共有 4 幅杂波图，每幅对应雷达的不同高度，雷达位于杂波图的中心，即半径为 60 km 的圆心处。杂波的强度用颜色区分，黑色区域表示没有地面回波，意味着这些区域位于遮蔽区。

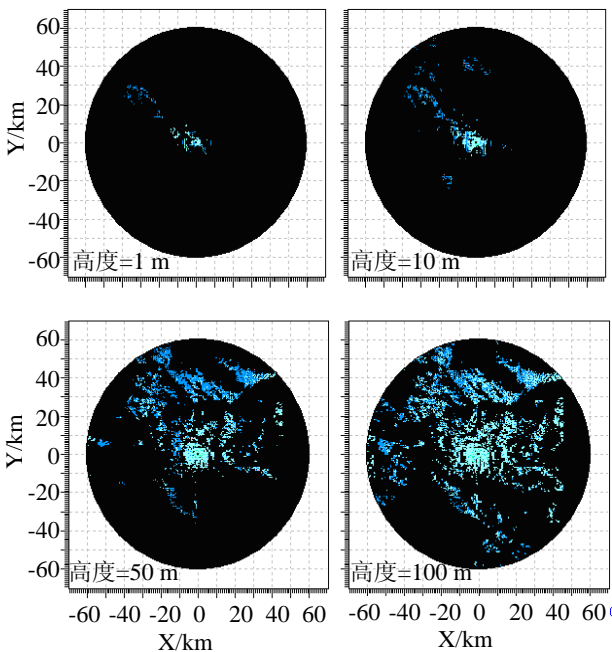


图 7 不同高度时的杂波图

从图中可以得出如下结论：

(1) 随着雷达高度的增加，遮蔽区域逐渐变小，更多的区域可以被照射到；

(2) 地面单元距离雷达越近，其后向散射系数越大，因为它们具有有更大的俯角；与林肯实验室的数据一致。

7 结论

本文通过讨论和分析雷达体系对抗仿真中射频信号传播过程中由外部环境引起的杂波、多径、绕射、大气折射和吸收效应的算法，建立了一个综

合射频环境模型，该模型能够为射频段雷达系统对抗仿真提供了一个综合、通用的仿真射频环境。

参考文献：

- [1] David K Barton. Radar System Analysis and Modeling [M]. USA: Artech House, 2005.
- [2] 曹晨, 王小谟. 关于雷达杂波性质研究的若干问题 [J]. 现代雷达, 2001, 23(5): 59-64.
- [3] Blake Lamont V. Radar Range-performance Analysis [M]. USA: Artech House, 1986.
- [4] Donald E Kerr. The Propagation of Short Radio Waves, vol.13, Radiation Laboratory Series [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1951.
- [5] Serpil Ayasli. SEKE: A computer model for low-altitude radar propagation over irregular terrain [J]. IEEE Trans. on AP (S0018-926X), 1986, 34(8): 1013-1023.
- [6] 王国玉, 汪连栋. 雷达电子战系统数学仿真与评估 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004, 6.
- [7] Maurice W Long. Radar Reflectivity of Land and Sea [M]. USA: Artech House, 2001.
- [8] B Liu, D C Munson Jr. Generation of a Random Sequence having a Jointly Specified Marginal Distribution and Autocovariance [J]. IEEE Trans. on ASSP (S0740-7467), 1982, 30(6): 973-978.
- [9] J B Billingsley. Low-Angle X-Band Radar Ground Clutter Spatial Amplitude Statistics [R]// Technical Report: CMT-831980. USA: Lincoln Laboratory, 1980, 8.
- [10] J B Billingsley. Statistical Analysis of Measured Radar Ground Clutter Data [J]. IEEE Trans. on AES (S0018-9251), 1999, 35(2): 579-593.
- [11] Gang Li, Kai-Bor Yu. Modelling and simulation of coherent Weibull clutter [C]// Proc, IEEE, vol. 136, Pt. F, No.1, Feb 1989. USA: IEEE, 1989, 136(1), Pt. F.
- [12] M Greco, F Gini, A Farina, J B Billingsley. Validation of Windblown Radar Ground Clutter Spectral Shape [J]. IEEE Trans. on AES (S0018-9251), 2001, 37(2): 538-548.
- [13] M Rangaswamy, D Weiner. Computer Generation of Correlated Non-Gaussian Radar Clutter [J]. IEEE Trans. on AES (S0018-9251), 1995, 31(1): 106-116.
- [14] 王全民. 地面环境射频效应建模与仿真研究 [D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2005, 11.
- [15] Meeks M L, Lilley A E. The Microwave Spectrum of Oxygen in the Earth's Atmosphere [J]. J. Geophys. Res: (S2169-897X), 1963, 68(6): 1683-1703.
- [16] Van Vleck J H. The Absorption of Microwaves by Oxygen, and The Absorption of Microwaves by Uncondensed Water Vapor [J]. Phys. Review: (S1056-8700), 1947, 71(7): 413-433.