

文章编号: 2095-4980(2022)03-0277-09

不同气象条件下雷达能量覆盖范围研究

李鹏飞, 冯 菊*

(西南交通大学 电磁所, 四川 成都 610031)

摘 要: 基于实际地形和气象条件, 通过插值技术实现从三维数字地球生成地形路径上高精度的高程数据, 结合大气折射率模型和抛物方程模型, 计算电磁波在地形剖面上的传播损耗。通过方位角扫描, 计算出单站雷达在空间特定高度的能量覆盖范围。仿真结果表明, 该方法可同时考虑气象和地理因素对雷达能量覆盖范围的影响, 与人眼视觉范围对比更能体现电磁波的传播效应, 为有效预测复杂气象地理环境下雷达能量覆盖范围提供了一种可靠的技术途径。

关键词: 三维数字地球; 抛物方程; 传播因子; 气象条件; 能量覆盖

中图分类号: TN011

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020137

Study on radar energy coverage under different meteorological conditions

LI Pengfei, FENG Ju*

(Institute of Electromagnetics, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: Based on the actual terrain and meteorological conditions, a method of extracting high-precision elevation data on an arbitrary terrain path from a three-dimensional digital earth is achieved by interpolation, and combining with atmospheric refractive index model and parabolic equation model, the propagation loss of electromagnetic waves in any terrain profile is calculated. The energy coverage of a monostatic radar at a certain altitude of space is computed. The simulation results show that the method proposed in this paper can deal with effects on radar energy coverage caused by both meteorological and geographical factors, and better exemplifies the propagation effects of electromagnetic waves while comparing with human visual range. It provides a reliable technical approach for predicting radar energy coverage in complex meteorological and geographic environments effectively.

Keywords: three-dimensional digital earth; parabolic equation; propagation factor; meteorological conditions; energy coverage

雷达的能量覆盖范围和探测范围主要取决于雷达自身的参数、所需探测目标特性和地理环境。地理环境主要指大气条件^[1]和地表地形结构^[2], 不同的气象条件和地势地表结构会对雷达的能量覆盖范围产生较大影响。光学方法^[3]是目前研究地形对雷达能量覆盖范围影响的主要方法, 通过将不同种类的地形等效成劈尖、单峰、半圆顶等典型障碍模型进行等效分析获得统计结果, 然而其对复杂地形建模精确度比较差, 在实际地形环境下的应用受到一定限制。抛物方程方法(Parabolic Equation Model, PEM)^[4]是根据波动方程推导出的确定性电波传播模型, 可以同时考虑气象条件和地形参数, 用来计算复杂环境下雷达在 360°方位角范围内对特定探测目标高度的能量覆盖。真实地形的高程数据由三维数字地球生成, 可以代表各个地区的地理环境。本文采用这种方法对台湾三处地形进行建模, 结合抛物方程模型为雷达能量覆盖范围预测提供了一种有效的技术途径。

1 理论方法

1.1 地形获取方法

通过三维数字地球获取地形高程数据^[5], 下载地形数据为 tif 格式图片。读取地形数据使用 Matlab 软件。代

收稿日期: 2020-04-03; 修回日期: 2020-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61801405)

*通信作者: 冯 菊 email:fengju-fj@swjtu.edu.cn

码命令如下: `data=imread('xxx.tif');` “xxx”为图片名字。

数字地球上每块地形都是以矩阵的形式存储下来,每个栅格点对应一个高程值,通过栅格点的计算可以得到经纬度。

从三维数字地图提取的数据按照一定的采样间隔抽取任意两点之间的地形剖面时,一些样点可能没有落在节点上,这些非节点处的高程值可以通过插值计算的方法来获取。本文采用双三次插值法^[6]来计算非节点处的高程值。在点 (x,y) 处的高程值 Z 可以通过矩形网格附近的16个采样点加权平均得到,需要用2个多项式的三次插值函数,每个方向使用一个。双三次插值通过式(1)进行计算。

$$Z = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} x^i y^j \quad (1)$$

计算系数 a_{ij} 的过程依赖于插值数据的特性,如果已知插值函数的导数,常用的方法就是使用4个顶点的高度以及每个顶点的3个导数。一阶导数 h'_x 与 h'_y 表示 x,y 方向的表面斜率,二阶相互导数 h''_{xy} 表示同时在 x 与 y 方向的斜率。这些值可以通过分别连续对 x 与 y 向量取微分得到,对于网格单元的每个顶点,将局部坐标 $(0.0,1.0,0.1$ 和 $1.1)$ 代入这些方程,再解这16个方程。

1.2 对地形的插值处理

图1为台湾海峡某区域地形图,首先选取一道参考直线 AB ,计算出 AC 之间的地球大圆路径^[7]长度。根据路径长度和采样点数计算出采样间隔以及相邻采样点之间的相对方位,确定出 A,C 以外其余采样点之间的相对方位,假设插值获得 AC 直线的地形剖面图,按 AB 采样点和实际采样点个数选择需要插值点的个数,根据 ABC 三点获得 $\angle BAC$ 的大小 θ ,再根据坐标轴转换式(2)以及起始点 A 点的坐标值,通过双三次插值获得 AC 直线之间的地形剖面数据。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2)$$

将取得的地形剖面数据信息代入到PEM模型中计算出雷达波在该路径上的传播情况。

1.3 抛物方程

PE模型是从波动方程^[8]中推导出来的公式,属于确定的传播模型。本文使用二维PE方法分离二维标量波动方程,可得二维抛物方程的解^[9]为:

$$u(x+\Delta x, z) = e^{ik_0(n-1)\Delta x} \mathfrak{T}^{-1} \left\{ e^{i\Delta x \sqrt{k_0^2 - p^2}} \mathfrak{T} [u(x, z)] \right\} \quad (3)$$

$$F = \sqrt{x} |u(x, z)| \quad (4)$$

式中: $u(x,z)$ 为传播的场值大小; k_0 为自由空间传播常数,在直角坐标系 (x,z) 中, Δx 为步进距离, x 为上一水平步进位置, z 为垂直高度, $n(x,z)$ 为大气折射指数; $\mathfrak{T}$ 和 $\mathfrak{T}^{-1}$ 分别为傅里叶正变换和逆变换, $p=k_0 \sin \theta$ 为傅里叶变换的角谱域变化量, θ 为电波的掠射角; F 为传播因子,其反映了地面海面反射、大气折射、大气散射等因素的影响。通过插值方法对大气折射率进行建模^[10],采用分步傅里叶变换(Split-Step Fourier Transform, SSFT)进行求解。该解第一部分体现了大气条件对电波传播的影响,第二部分体现了地形结构变化对电波传播的影响。然后设定初始场和边界条件^[11](地形边界和吸收边界)。初始场可以通过格林函数^[12]求得。本文求解了不同大气结构(悬空波导,雨雪天气)下的电波传播,地表结构考虑电磁波的散射和绕射,通过地表的阻抗边界条件,将不同种的地表介电常数和电导率参数加入到抛物方程模型中。抛物方程模型可以根据频率算出每段路径的阻抗边界条件^[13]。将图1路径 AC 所示的地形代入到PE中,采用标准大气条件,算出该剖面的电波传播伪彩图(雷达波频率为2.4 GHz,波瓣宽度为 3° ,天线高度为200 m,水平极

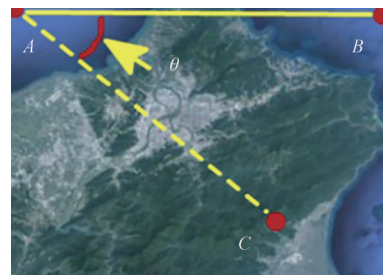


Fig.1 Interpolation path selection
图1 插值路径选取

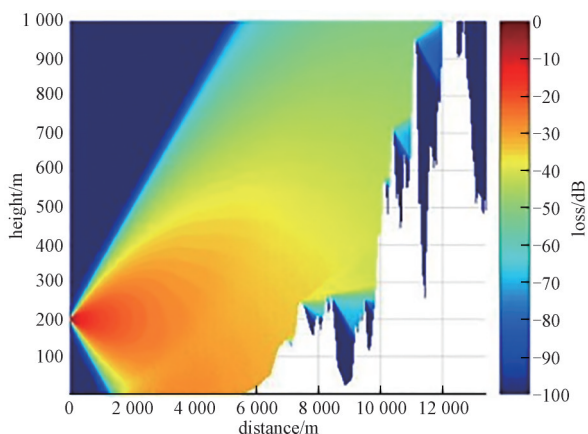


Fig.2 Path AC propagation field
图2 路径AC传播场

化,方向图为高斯函数),见图2。地形由部分海面 and 干燥地面组成,天气为晴天。

1.4 人眼视觉范围

人眼视觉高度包括人眼通视(looking through height)高度和人眼可视(visible height)高度。人眼通视高度指的是人在借助望远镜平视而不仰视可以看到的高度范围。人眼可视高度指的是人在借助望远镜通过俯仰视角可以看到的高度范围,见图3。因此通视范围指的是人在平视下所能观测到的区域范围,可视范围指的是人在最大视角内所能观测到的区域范围。

1.5 雷达能量覆盖范围计算

通过PE模型可以计算每条路径上所有高度上雷达波传播场值,通过计算传播因子或场强大小可以描述雷达波传播的能量大小。传播因子或场强的彩图分布可以描述雷达的能量覆盖效果。

根据上述方程设计了以下计算雷达能量覆盖范围的方法:

- 1) 根据实际需要设置一个最大的收发距离 $R_{\max}$,以 $R_{\max}$ 为半径在水平面上按一定角度(1°)间隔逆时针扫描 90° 或 360° ,计算出各个方位角接收点对应的经纬度。
- 2) 根据传播距离设置采样点个数,由发射点和接收点按扫描角度依次插值计算获取剖面地形。
- 3) 通过抛物方程模型计算每条路径上所有高度的电波传播场值和传播因子。
- 4) 选取特定的高度作为雷达探测高度,选取每条路径上探测高度的传播因子,将所有路径上的探测高度的传播因子计算出来,用来描述该区域内特定高度雷达波的能量大小。
- 5) 设置不同高度,通过步骤1)~4)计算出雷达波在该区域内不同高度能量大小,将其与人眼可视范围和通视范围进行对比,调整雷达俯仰角再进行对比,得到雷达能量覆盖情况。
- 6) 设置不同大气波导,查询雨天、雾天等特殊天气下的电导率和介电常数,计算折射率,通过步骤1)~4)计算出该区域内特定高度雷达能量大小。

2 不同气象条件下雷达能量覆盖范围仿真分析

2.1 不同波导条件对雷达能量覆盖范围的影响

第1块区域位于东经 121.55° 、北纬 25.074° 附近,探测距离为16 000 m,采样点数为400个,计算出该地形下人眼的100 m高度下的通视范围和可视范围。对人眼通视范围的计算方法是选取地形,见图4。

设人眼置于红点位置,人眼高度为100 m,扫描半径为16 000 m,扫描半径为虚线,黄色线内区域为沿黄色虚线半径从绿色线沿箭头方向按 90° 至红色线区域。设置视觉高度为100 m,每隔 1° 扫描一次,根据插值得到每条扫描路径上的地形数据,沿半径从0计算至16 000 m。如果地形出现第1个高度大于或等于100 m的数据,则将该点位标记;如果全小于100 m,则将终点标记,该点就为人眼在该路径上所能达到的最远通视范围。将每条路径上该点位用线连接起来,该线以内即为通视区域。图5为人眼置于100 m高度时人眼的通视范围,黄色区域为通视范围。对人眼可视范围的计算也采用上述算法,不同之处是每条路径取最高点所在点,如果该路径上所有点的高程均小于视高100 m,则取终点处,将所有点位连接起来,线内为可视范围。结果见图6,为人眼可视范围图。雷达能量覆盖范围的计算:雷达自身参数为频率2.4 GHz,天线高度为100 m,雷达位于图4红点处,扫描方向仍是从绿色线到红色线位置,扫描角度间隔 1° ,扫描半径为16 000 m,每条路径上采样点数400个,天线俯仰角 0° ,波瓣宽度 3° ,大气为标准大气条件,计算出100 m(主辐射高度)高度该区域传播因子分布,见图7。调整天线仰角为 5° ,计算500 m高度处天线传播因子分布见图8,单位为m,深蓝色区域为传播因子为0的区域,也就是非能量覆盖区域,黄色区域为覆盖效果最佳区域,淡蓝色为能量较弱分布区域,图8圆心区域由于探测高度未取主辐射高度,所以呈蓝色。

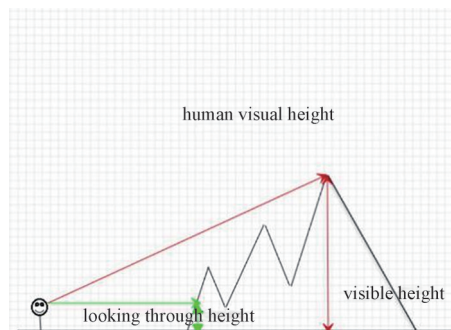


Fig.3 Schematic diagram of the visible height of human eyes
图3 人眼通视可视高度示意图



Fig.4 Schematic diagram of area-1 radar scanning
图4 区域一雷达扫描示意图

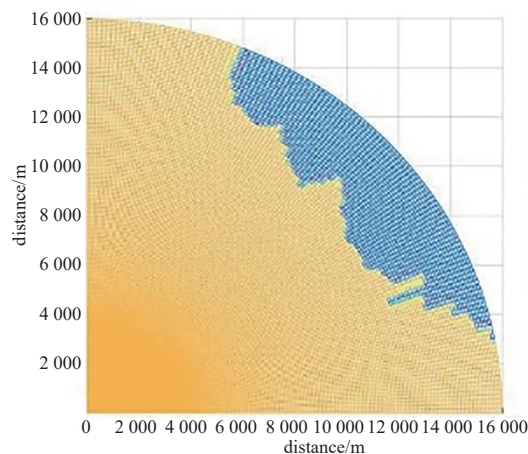


Fig.5 Area of human eyes
图5 人眼通视范围

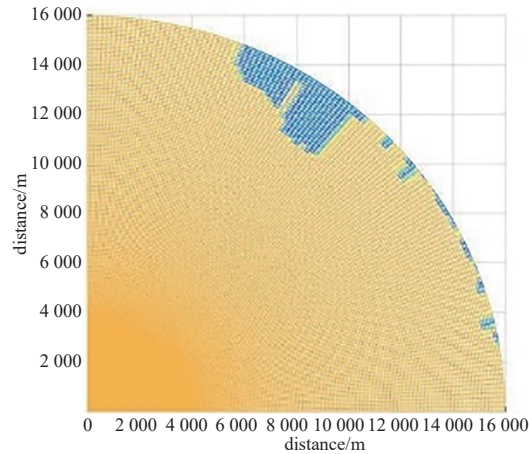


Fig.6 Visual range of human eyes
图6 人眼可视范围

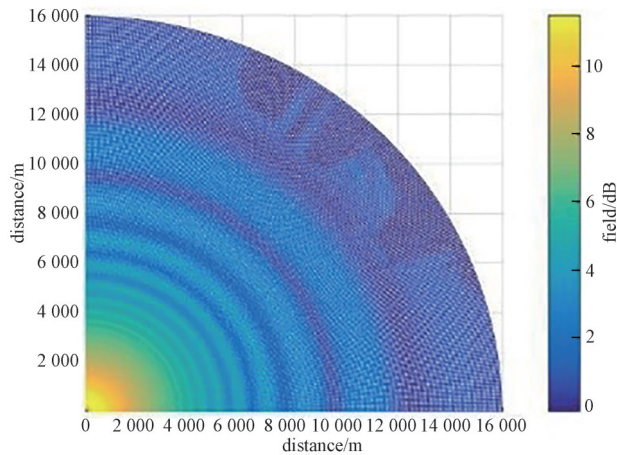


Fig.7 Radar energy distribution at 100 m altitude
图7 雷达100 m高度能量分布

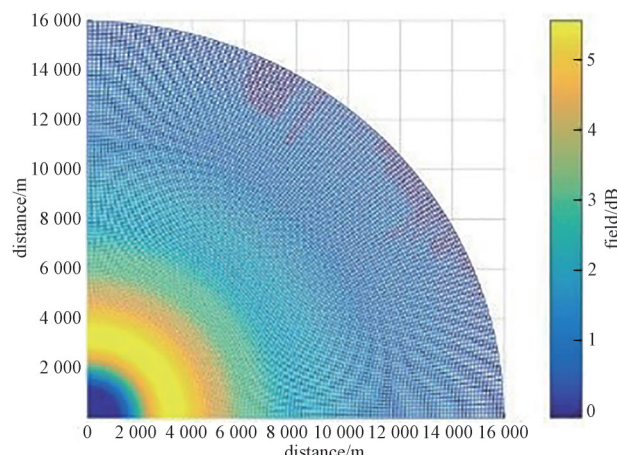


Fig.8 Radar energy distribution at 500 m altitude at 5° elevation
图8 雷达5°仰角500 m高度能量分布

通过对比人眼 100 m 高度通视图和雷达 100 m 高度传播因子分布图可知，在该地形海面部分(0°~20°和 60°~90°的扫描角区域内)二者可探测区域覆盖范围相同。在山地处(探测半径 11 000~16 000 m，探测角度 20°~60°的区间内)，雷达的能量覆盖范围在多数路径上要比人眼通视范围大 500~2 000 m。雷达仰角为 5°时，天线高度为 100 m，在 500 m 高度的探测能量分布和人眼可视范围分布比较可以看出，在扫描角度为 45°~60°的区间，雷达能量覆盖范围比人眼可视范围大 2 000 m 左右，如果增大仰角，近乎全范围的覆盖效果，通过对比人眼通视范围和雷达平角扫描能量覆盖范围可以看出，在地形遮挡的情况下，雷达俯仰和平扫的能量覆盖范围均比人眼视觉范围大 500 m~2 000 m。这是因为在计算雷达波能量辐射时使用了抛物方程算法，抛物方程模型本身就能体现电波传播的折射和绕射效应。在扫描角度 20°~60°区间的山地内，人眼的可视范围只能达到最高地形所在的位置，而雷达波的绕射和折射效应使得最高的山峰后面，依然有雷达波能量的覆盖。增加雷达的仰角，绕射效果增强，覆盖范围增大。即便是在雷达波平角扫描的情况下，和人眼通视(平视)范围对比，雷达波依然可以绕过和雷达主射高度(即人眼通视高度)同等高度的地形传播，能量覆盖面积大于人眼通视范围。这一效果在图 5~图 8 对比中可以看到。图 9 是俯仰角为 5°时取天线 60°扫

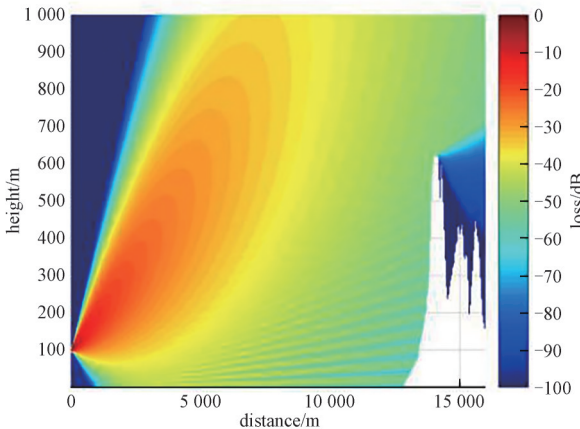


Fig.9 Radar electric field profile at 5° elevation angle
图9 雷达5°仰角电场剖面图

描角的电场剖面图。

大气对电波传播的影响主要取决于大气折射指数 n ，一般来说， n 具有非均匀的空间分布，这就使得无线电波在大气中的传播速度要小于光速，并呈现相应的空间变化，从而引起波阵面的偏转，这就是大气折射效应。大气波导是对流层中具有异常大气折射率梯度的大气结构，对于评估和预测电磁波传播和海上探测通信系统具有重要的科学意义和应用价值，常见的大气波导有悬空波导、表面波导、蒸发波导等，下面主要比较的是悬空波导，采用插值方法对悬空波导进行建模，见图 10。

雷达条件数据不变，仰角为 0° ，悬空波导条件下，计算出雷达 100 m 高度处的能量覆盖范围见图 11。

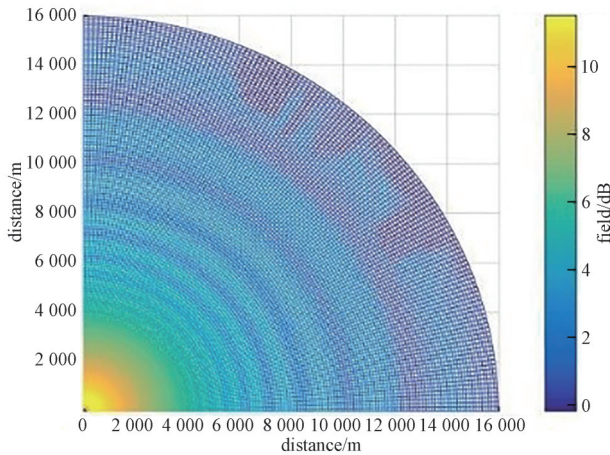


Fig.11 Radar 60° scanning angle field under the suspended waveguide
图 11 悬空波导下雷达 60°扫描角电场剖面图

比较 100 m 悬空波导能量覆盖范围图和 100 m 标准大气能量覆盖范围图，可以看出在 4 000 m 以外区域悬空波导内雷达能量较强，同标准大气条件相比损耗减少 20% 左右，其次在 $30^\circ\sim45^\circ$ 扫描角度内雷达能量覆盖范围比其在标准大气条件下稍远。这是由于悬空波导形成的大气薄层能引起雷达波的陷获，当电磁波在近海面传播时，部分能量被陷获进波导层内，使其传播损耗小于标准大气条件，在这种情况下雷达波强度大于标准大气环境下的场值，绕过某些障碍物后信号也比没有大气波导存在时稍强，这就是为什么在 $30^\circ\sim45^\circ$ 的一些区域内传播距离比标准大气条件下稍远。

2.2 不同天气条件对雷达能量覆盖范围的影响

第 2 块区域是位于东经 120.55° ，北纬 23.84° ，该地区卫星投影地形地势见图 12，仍然按照前面的方法根据图 12 的方式将该区从绿色线区域转动 90° 扫描至红色线区域。

单雷达站位于红点处，天线频率为 5 GHz，天线高度为 200 m，仰角为 0° ，波瓣宽度为 5° ，探测半径为 13 400 m，采样点数为 336 个，大气条件为标准大气，气象条件为晴天，对 200 m 高度雷达能量覆盖仿真见图 13。

波长较短的毫米波在传播过程中容易受到各种特殊气象条件的影响，特殊气象条件中雾是影响毫米波通信系统的典型之一。雾是由悬浮在近地面大气中的微小水滴或冰晶形成的一种胶体系统。通常水

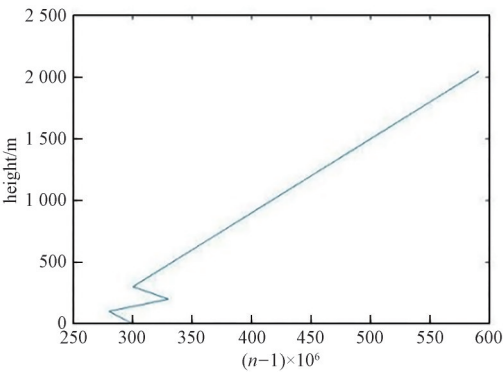


Fig.10 Sectional view of suspended waveguide
图 10 悬空波导大气折射率剖面图

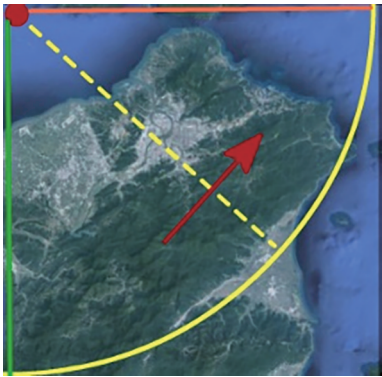


Fig.12 Schematic diagram of area 2
图 12 区域二雷达扫描示意图

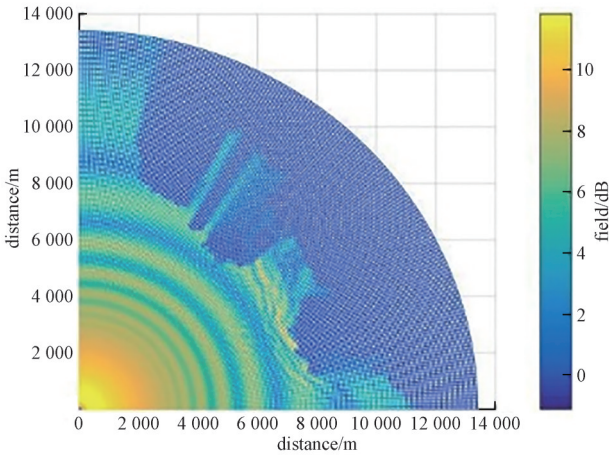


Fig.13 Energy distribution of the radar at a height of 200 m on sunny day
图 13 晴天雷达 200 m 高度能量分布

平能见度小于 1 000 m 时，应考虑雾滴的吸收和散射对电磁波产生的衰减^[14]。对雾媒质的电磁建模采用文献[15]中的方法，将雾媒质等效为雾滴与空气形成的混合物。用 Maxwell-Garnett 公式(5)计算雾媒质的等效介电常数，通过修改折射率 $n = \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ 并代入到 PE 模型的 SSFT 解中。

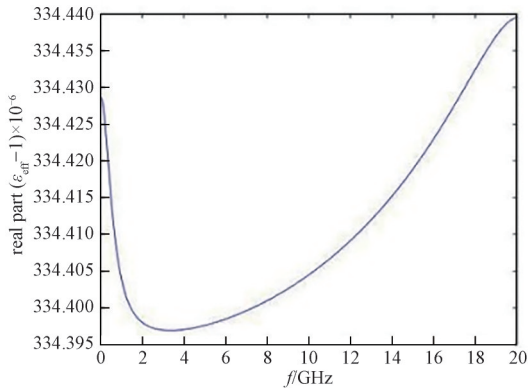


Fig.14 Real part of effective dielectric constant in fog
图 14 雾天等效介电常数实部

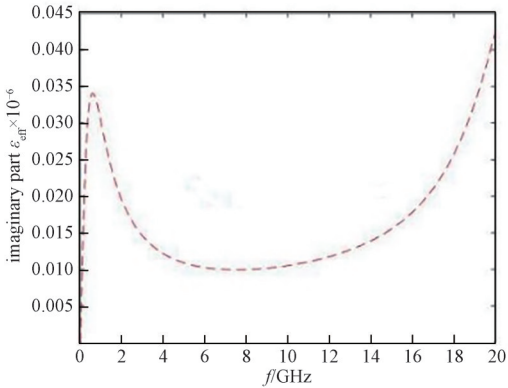


Fig.15 Imaginary part of effective dielectric constant in fog
图 15 雾天等效介电常数虚部

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_0 \frac{3f\epsilon_0(\epsilon_\omega - \epsilon_0)}{(\epsilon_\omega + 2\epsilon_0) \left(1 - \frac{f(\epsilon_\omega - \epsilon_0)}{(\epsilon_\omega + 2\epsilon_0)} \right)} \quad (5)$$

式中： ϵ_0 为背景媒质即空气的介电常数； ϵ_ω 为雾滴即水的介电常数； f 是雾滴的体积浓度。根据该模型计算了 200 m 能见度 0~20 GHz 的等效介电常数，结果见图 14 和图 15。

根据等效介电常数修正折射率后计算雾天该区域能量覆盖范围，见图 16，同晴天相比，雾天情况下，由于雾天介电常数的变化，雷达波能量变弱，场强下降了 10%，但与晴天相比能量传播距离并没有较大变化。图 17 和图 18 为 60° 扫描角晴天和雾天电场剖面图的对比，在第 1 个山峰后面，二者能量强度存在明显差异。

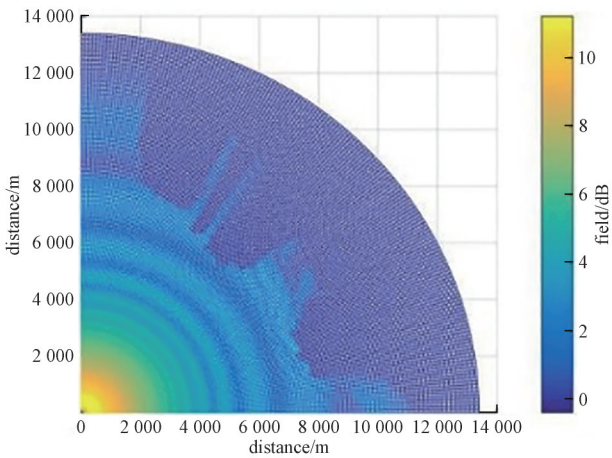


Fig.16 Energy distribution at 200 m altitude in foggy day
图 16 雾天 200 m 高度能量分布

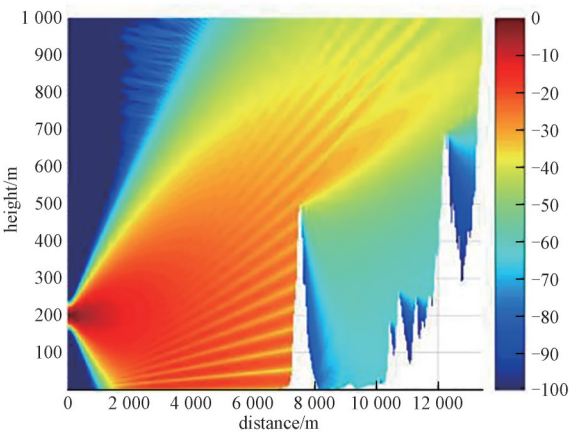


Fig.17 Field strength at 60° scanning angle on a sunny day
图 17 晴天 60° 扫描角场强

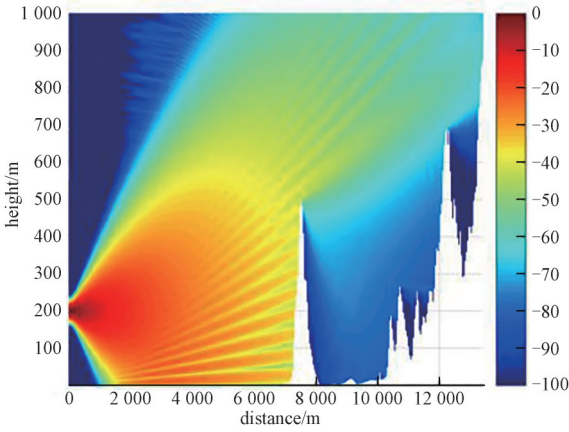


Fig.18 Field strength at 60° scanning angle in foggy
图 18 雾天 60° 扫描角场强

雨水介质被视为各向异性混合物，其中包括不同的球形和椭球形的大小不同的雨滴。雨会因为吸收和散射雷达波造成一定程度的传播损耗。当毫米波通过雨水介质传播时，要考虑到雨滴的吸收和散射，通过修改折射率 $n = \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ 并代入到 PE 模型的 SSFT 解中，对于雨滴介电常数的建模采用文献[16]中的方法。

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \sum_{i=x,y,z} \left[\varepsilon_0 + \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) \alpha(D) \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_0 - L_i \alpha(D)} dD \right] \hat{u}_i \hat{u}_i \quad (6)$$

式中： N 为雨滴分布谱； D 为一颗雨滴的直径； $\hat{u}_i \hat{u}_i$ 为一种对角去极化二元体； $\hat{u}_i$ 为雨滴的轴线方向；极化率 $\alpha = \frac{v_0 \varepsilon_0 (\varepsilon_w - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0 + L_i (\varepsilon_w - \varepsilon_0)}$ ， v_0 为雨的体积； L_i 为关于频率和温度的函数。通过计算得到雨天(降雨 20 mm/h)复介电常数的实部和虚部，结果见图 19 与图 20。

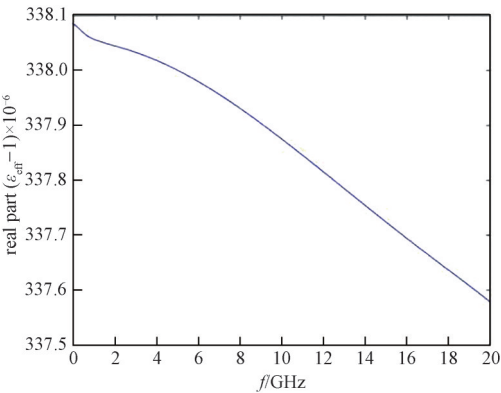


Fig.19 Real part of the effective dielectric constant in rain
图 19 雨天等效介电常数实部

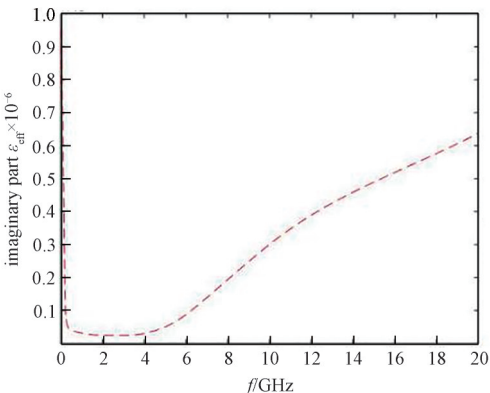


Fig.20 Imaginary part of the effective dielectric constant in rain
图 20 雨天等效介电常数虚部

将雨天介电常数代入到 PE 计算雷达能量覆盖，见图 21。与晴天相比，由于雨天介电常数的变化，山地部分场强减弱了 20%，在 80°~90°扫描角无山脉遮挡区域传播距离也缩短了。图 22 是对晴天、雾天、雨天在雷达 60°扫描路径上 6 000 m 处传播场强对比，通过计算数据可得，在雾天能见度为 200 m 和降雨量为 20 mm/h 的情况下，雨天和晴天相比场强大概减小 20 dB 左右，雾天减小 10 dB 左右，3 种天气下传播场强的差值随着距离的变化逐渐减小。通过计算数据可得，在雾天能见度为 200 m 和降雨量为 20 mm/h 的情况下，雨天和晴天相比场强大概减小 20 dB，雾天减小 10 dB 左右，随着传播距离的增加，3 种天气情况下雷达波传播场强逐渐一致。

2.3 全方位雷达能量覆盖范围

通过以上方法，接下来计算了北纬 23.44°~24.04°，东经 120.35°~120.98° 的区域，该区域卫星投影图(单位为 m)见图 23。

探测半径 65 km(黄色虚线)，采样点数 700 个，单雷达站位于图 23 标注的红色点，探测区域为以雷达站为圆心，探测半径为半径的圆形区域内。大气为标准大气，天气为晴天。天线频率 500 MHz，天线方向图为高斯天线，仰角为 0°，波瓣宽度为 5°，水平极化，收发天线增益为 50 dB，发射功率为 50 kW，接收灵敏度 -30 dBmW。将雷达架设在地图中心海拔 1 700 m 的山上，计算雷达能量覆盖。图 24 中将雷达能量覆盖图和地形结合，得到该地区 1 700 m 雷达能量覆盖效果图。图 25 中，因西部地区多为平原，能量覆盖效果较好，东部多为山区，覆盖效果较差，多被地形阻挡。

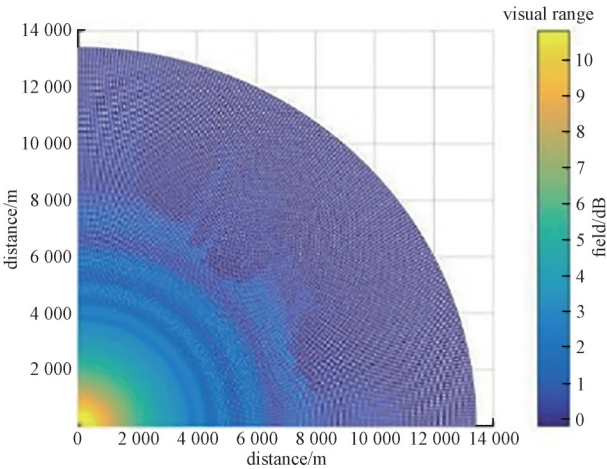


Fig.21 Energy distribution at a height of 200 m on a rainy day
图 21 雨天 200 m 高度能量分布

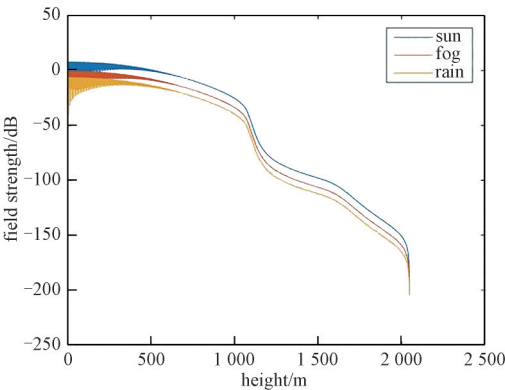


Fig.22 Field strength in different weathers
图 22 不同天气下的场强



Fig.23 Satellite projection of regional 3
图 23 区域三卫星投影

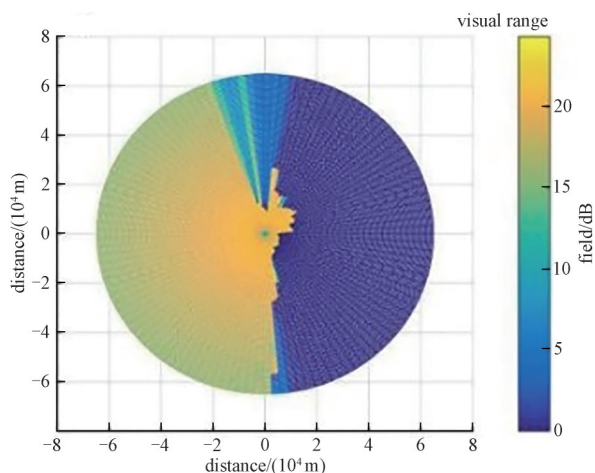


Fig.24 Energy coverage of 1 700 m radar
图 24 1 700 m 雷达能量覆盖范围

3 结论

本文借助三维数字地球,给出了用双三次插值方法处理地形高程数据的方法,为使用抛物方程法预测雷达波传播提供了精确的地形数据支持。抛物方程可表征雷达波的折射和绕射效应,更准确地预测雷达覆盖范围。仿真结果表明,在地形遮挡的情况下,雷达平角和仰角时,雷达波比人眼视觉距离长约 500~2 000 m,雷达覆盖范围增大约 3%~12%。由于雷达波容易受大气条件的影响,本文采用混合折射率模型,计算了雷达波在不同大气波导和不同天气环境下的传播场值,研究了雨雾天气对雷达波传播的衰减以及雷达波在波导层内的超视距传播特点,计算了在不同气象环境下雷达波的场强变化和雷达能量覆盖范围,总结出多变的气象环境对雷达波传播的影响。最后通过仿真将雷达能量覆盖范围和地貌进行拟合得到了全方位的雷达能量覆盖范围,效果更加直观,为有效预测复杂气象地理环境下雷达的能量覆盖范围提供了一种直观便捷的方法。

参考文献:

- [1] 盛楠,廖成,张青洪,等. 太赫兹波大气衰减的抛物方程模型[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(2):175-179. (SHENG Nan,LIAO Cheng,ZHANG Qinghong,et al. Parabolic equation model of atmospheric attenuation of terahertz waves[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(2):175-179.)
- [2] 金慧琴,王正磊,宋斌斌. 复杂地形条件下电波传播特性预测[J]. 信息通信, 2017(10):15-18. (JIN Huiqin,WANG Zhenglei, SONG Binbin. Prediction of radio wave propagation characteristics under complex terrain conditions[J]. Information and Communications, 2017(10):15-18.)
- [3] 陈鹏,吴玲达,杨超. 虚拟战场环境中地形影响下雷达作用范围表现[J]. 系统仿真学报, 2007,19(7):1500-1503. (CHEN Peng, WU Lingda,YANG Chao. Performance range of radar under the influence of terrain in virtual battlefield environment[J]. Journal of System Simulation, 2007,19(7):1500-1503.)
- [4] LIU Wei. Block-centered finite difference methods on rectangular composite grids with refinement in space for parabolic equation[J]. International Journal of Computer Mathematics, 2020,97(3):564-584.
- [5] 唐胜军,张立东,王少杰. 浅谈 Google 地球高程数据的提取[J]. 河南水利与南水北调, 2012(8):105-106. (TANG Shengjun, ZHANG Lidong,WANG Shaojie. On the extraction of Google Earth elevation data[J]. Henan Water Resources and South-to-North Water Diversion, 2012(8):105-106.)
- [6] DANILO Costarelli,MARCO Seracini,GIANLUCA Vinti. A comparison between the sampling Kantorovich algorithm for digital image processing with some interpolation and quasi-interpolation methods[J]. Applied Mathematics and Computation, 2020, 374:125046.
- [7] TSUNODA R T,TAKASHI Maruyama,TSUGAWA Takuya,et al. Off-great-circle paths in transequatorial propagation:1.discrete

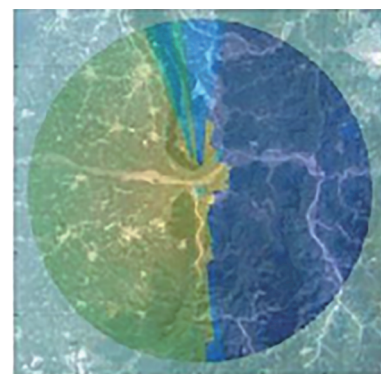


Fig.25 Energy fitting diagram of terrain radar
图 25 地形雷达能量拟合图

- and diffuse types[J]. Journal of Geophysical Research:Space Physics, 2016,121(11):11157–11175.
- [8] 逯贵祯,张荣蜀,王瑞东. 基于抛物方程法的电波传播预测[J]. 杭州电子科技大学学报(自然科学版), 2016,36(3):12–17. (LU Guizhen, ZHANG Rongshu, WANG Ruidong. Prediction of radio wave oropagation based on parabolic equation method[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University(Natural Science), 2016,36(3):12–17.)
- [9] 胡绘斌. 预测复杂环境下电波传播特性的算法研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2006. (HU Huibin. Research on algorithms for predicting radio wave propagation characteristics in complex environments[D]. Changsha, China: National University of Defense Technology, 2006.)
- [10] 俞红兵,胡绘斌,储飞黄. 宽角抛物方程模型处理复杂地形的一种方法[J]. 通信技术, 2019,52(3):524–528. (YU Hongbing, HU Huibin, CHU Feihuang. A method for handling complex terrain by wide-angle parabolic equation model[J]. Communication Technology, 2019,52(3):524–528.)
- [11] 胡绘斌,柴舜连,毛钧杰. 宽角抛物方程在阻抗边界条件下的应用[J]. 电波科学学报, 2005,20(4):90–94. (HU Huibin, CHAI Shunlian, MAO Junjie. Application of wide-angle parabolic equations under impedance boundary conditions[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005,20(4):90–94.)
- [12] MARKUS Lazar. Second gradient electrodynamics: green functions, wave propagation, regularization and self-force[J]. Wave Motion, 2020,95:102531.
- [13] CHEN Peng, WU Lingda. 3D representation of radar coverage in complicated environment[J]. Simulation Modeling Practice and Theory, 2008,16(9):1190–1199.
- [14] 卢昌胜,吴振森,赵振维,等. 云雾对THz波传播的衰减研究[J]. 电波科学学报, 2015,30(4):718–722. (LU Changsheng, WU Zhensen, ZHAO Zhenwei, et al. Attenuation of THz wave propagation by clouds and fog[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2015,30(4):718–722.)
- [15] 盛楠,廖成,张青洪,等. 预测毫米波雾衰减的抛物方程模型研究[J]. 电子学报, 2014,42(5):958–962. (SHENG Nan, LIAO Cheng, ZHANG Qinghong, et al. Research on parabolic equation model for predicting millimeter wave fog decay[J]. Acta Electronica Sinica, 2014,42(5):958–962.)
- [16] KHARADLY M M Z, CHOI A S. A simplified approach to the evaluation of EMW propagation characteristics in rain and melting snow[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1988,36(2):282–296.

作者简介:

李鹏飞(1994–), 男, 山东省泰安市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电波传播. email:1846263944@qq.com.

冯菊(1979–), 女, 四川省泸定市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为电波传播.