

基于电波传播模型的电磁信号覆盖范围计算

湛振华¹ 张 萌¹ 李 海¹

CHEN Zhenhua ZHANG Meng LI Hai

摘 要

针对大气气象环境复杂、地形起伏变化的复杂电波传播场景,基于自由空间传播理论的电磁信号覆盖范围计算结果与实际情况不符。为更加准确地反映电磁信号覆盖范围,综合运用电波传播模型设计自动匹配规则,实现自适应电波传播衰减计算,提高电波传播衰减计算的准确性。基于自适应电波传播衰减计算,针对不同场景分别采用栅格和包络两种形式更加准确地对覆盖范围进行表征,设计相应的计算算法。通过计算机软件进行了实验验证,证明了所提方法的有效性,提升了电磁信号覆盖范围计算的准确度。

关键词

电波传播; 衰减计算; 模型自动匹配; 信号覆盖范围; 栅格覆盖; 包络覆盖

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.10.027

0 引言

在通信电台、发射基站选址及军事领域中电磁设备的布阵、电磁设备能力评估等方面,电磁信号覆盖范围计算有非常重要的应用意义。

电磁信号按照一定功率进行发射,经过空间传播衰减、地形遮挡等影响,能够接收到该电磁信号的区域,即为电磁信号覆盖范围。其中,能够接收该电磁信号的区域定义为接收到的电磁信号功率大于接收门限的区域。电磁信号覆盖范围可按照三维和二维两种情形进行分析,二维覆盖可以看作是三维覆盖范围在某一水平高度面上的切面,具有显示直观、计算量小等优点,在实际应用中常常使用,本文研究的覆盖范围特指二维覆盖范围。

电磁信号覆盖范围一方面受发射机等效辐射功率、接收机增益、接收灵敏度的影响,另一方面受电磁波在传播过程中复杂环境的影响,包括地球曲率、地形起伏、大气衰减、电磁散射、反射等,需要综合运用电波传播模型、空间几何关系、地形数据等,实现对电磁信号覆盖范围的准确预测^[1]。

1 电磁信号覆盖计算原理

电磁波经发射天线辐射到空间中,由于信号能量在空间的扩散,在传播一定距离后,指定位置处接收到的信号功率为^[2]:

$$P_R(d) = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi d)^2 L} \quad (1)$$

式中: $P_T G_T$ 为发射机等效辐射功率, G_R 为接收增益, λ 为电磁信号波长, L 为与传播无关的损耗因子, d 为传播距离。

上式转换为 dB 形式表达为^[3]:

$$P_R(d) = ERP - 32.4 - 20\log(f) - 20\log(d) - L + G_R \quad (2)$$

式中: ERP 为等效辐射功率(单位: dBm), f 为电磁信号频率(单位: MHz), d 为传播距离(单位: km), G_R 为接收增益(单位: dB), L 为损耗因子(单位: dB, 通常取一定的经验值,对自由空间的传播损耗为 0)。

已知发射机等效辐射功率、电磁信号频率、接收灵敏度等参数,利用上式即可计算得到该电磁信号的最大传播距离 $d_{\max}$ 。此外,由于电磁波的直线传播,需要考虑地球曲率的影响^[4]:

$$d_0 = 4.12 \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (3)$$

式中: h_1 为发射点的高度(单位: m), h_2 为接收点的高度(单位: m), d_0 为通视视距(单位: km)。电磁信号的最大传播距离取 $d_{\max}$ 和 d_0 的较小值。

电磁信号覆盖范围的一种简单计算方式是根据发射天线的角度覆盖,按照一定步长进行分割,对每一个角度计算得到最大传播距离,进而得到电磁信号覆盖范围。

对复杂场景下的电磁信号覆盖范围计算,其电波传播衰减预测较为复杂,常规的计算方式无法真实反映实际覆盖情况,需要结合不同场景下的电波传播模型、地形数据、大气环境等进行分析计算^[5-8]。本文对常用电波传播模型的使用范围进行梳理总结,设计形成自适应电波传播衰减计算方法,再基于该方法探讨电磁信号的覆盖范围的表征形式和对应的算法,实现电磁信号覆盖范围精确计算。

2 自适应电波传播衰减计算

电波传播衰减需要针对电磁波传播的不同场景采用不同的传播模型进行预测,包括空间直射波传播、地海面传播、

对流层散射传播、电离层反射 / 散射传播、大气波导传播、降雨传播等。国际电信联盟（International Telecommunication Union, ITU）提出了一系列针对不同场景的电波传播预测模型，能够对特定的环境进行较为准确的电波传播衰减预测。

对常用电波传播衰减计算模型的适用条件进行梳理，设计相应的匹配规则，自动匹配与传播环境相适应的传播模型进行传播衰减预测，实现复杂场景的电波传播衰减自适应计算，使电波传播衰减计算结果更准确。

从电磁波频率、收发平台类型、传播距离等维度形成电波传播模型匹配规则，见表 1。

表 1 电波传播模型匹配规则

模型	适用距离 /km	频率范围	收发平台
Longley-Rice 模型	1 ~ 2000	30 MHz ~ 40 GHz	陆 - 陆
ITU-R P.368	≥100	10 kHz ~ 30 MHz	海 / 陆 - 海 / 陆
ITU-R P.452	< 10 000	100 MHz ~ 50 GHz	海 / 陆 - 海 / 陆
ITU-R P.526	1 ~ 1000	30 MHz ~ 10 GHz	陆 - 陆
ITU-R P.528	100 ~ 1800	125 MHz ~ 15.5 GHz	海 / 陆 - 空
ITU-R P.533	100 ~ 1800	2 ~ 30 MHz	海 / 陆 - 海 / 陆
ITU-R P.618	—	1 ~ 55 GHz	卫星 - 陆
ITU-R P.680	—	0.8 ~ 8 GHz	海 - 卫星
ITU-R P.681	—	800 MHz ~ 20 GHz	卫星 - 陆
ITU-R P.1147	50 ~ 12 000	150 kHz ~ 1700 kHz	海 / 陆 - 海 / 陆
ITU-R P.1546	1 ~ 1000	30 MHz ~ 3 GHz	海 / 陆 - 海 / 陆
ITU-R P.2041	—	30 MHz ~ 50 GHz	空 - 陆 / 海 / 卫星

注：“海”指海面平台，“空”指空中平台，“陆”指陆地平台，“卫星”指卫星平台。

自适应电波传播衰减计算首先根据要计算的场景类型，进行电波传播模型自动匹配，选择合适的电波传播模型完成衰减计算。根据电波传播模型的类型，进一步判断是否需要进行地球视距、地形遮蔽分析，如对直线传播的模型，当不满足地球视距或被地形遮挡时，电磁波无法到达，对衰减结果取无限大的值。

3 基于自适应电波传播衰减计算的覆盖范围计算

3.1 覆盖范围的表征形式

电磁信号覆盖范围可用角度、最大传播距离来表征，当需要考虑地形遮蔽的影响、天线增益的变化等情况时，需要采用更精细的表征方式。常用的表征方式是包络形式和栅格形式。

3.1.1 包络形式覆盖范围

包络形式表征即采用顺序相连的位置点形成封闭的覆盖范围包络，包络内的范围表明有电磁信号覆盖。该方式只需

获取每个角度上的电磁信号最大传播距离的位置点，计算量和数据量都比较小，易于在地图上显示。然而，其无法表征较复杂的电磁信号覆盖情况，如存在多个山峰、城市建筑等遮挡的情况，使得覆盖范围无法用一个简单封闭的包络来描述。在覆盖范围轮廓的内部，存在许多电磁无法覆盖的小区域，此时若采用包络方式表征覆盖范围将会导致计算算法复杂，难以真实反映实际覆盖范围。

3.1.2 栅格形式

针对无法用简单封闭包络描述覆盖范围的复杂场景，可对关注区域划分栅格，对栅格内每个位置点判断能否收到该电磁信号，通过对能收到的位置区域着色即可形成电磁信号覆盖范围^[9]。

栅格方式计算算法相对简单，能准确地描述复杂场景的信号覆盖范围，但是计算量和数据量都比较大，计算精度受限于栅格的大小，而且数据量大导致对覆盖范围的地图显示有较高的要求，因此在不必要的情况下不建议采用这种方式表征覆盖范围。

基于自适应电波传播衰减计算的覆盖范围计算需要结合实际场景和电波传播模型种类，确定覆盖范围的表征方式，并设计相应的算法实现。

3.2 栅格方式的覆盖范围计算

栅格方式表征的覆盖范围，只需要对可能接收到的电磁信号区域划分栅格，对每个栅格位置点计算收到的信号强度，判断信号强度是否大于接收门限，即可得到覆盖范围，如图 1 所示。

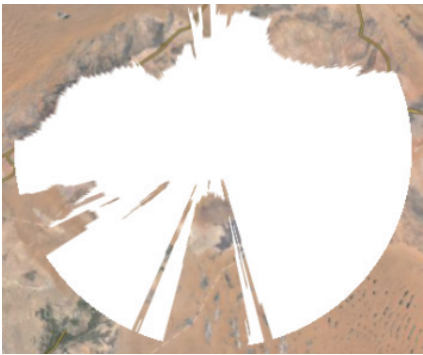


图 1 栅格形式的覆盖范围

栅格方式表征的覆盖范围针对以下场景。

3.2.1 发射机下视

当发射机位置高于要计算的覆盖范围的高度，且在该高度层存在地形遮挡时，电磁波的直线传播路径受限于几何关系，使该高度层的覆盖范围无法简单用封闭包络形式表征。

如图 2 所示，当发射机 T 所处高度 h_1 高于待计算的高度层 h_2 时，山峰的遮挡导致处于山峰后的区域无法接收到信号，使得计算高度层 h_2 上的覆盖范围无法用简单的封闭包络表示，这种情形覆盖范围采用栅格方式更准确。

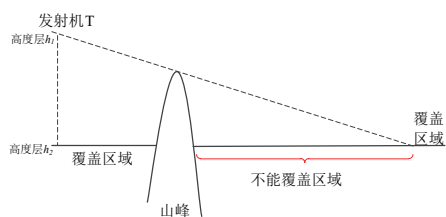


图2 下视几何遮挡剖面

3.2.2 传播模型衰减不单调

电磁波的折射、散射、绕射等情形的发生，使得某些复杂场景下电波传播衰减与传播的直线距离不是单调增加。例如，对 Longley-Rice 传播模型^[10-11]，由于非规则地形遮挡和对流层散射等影响，其衰减与直线传播距离不是单调的关系，见图3。

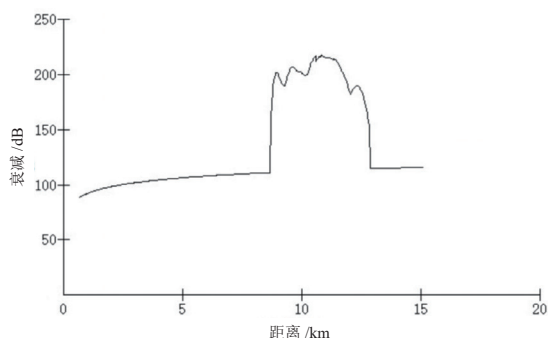


图3 传播模型衰减非单调

当最大传播距离刚好落于该传播模型衰减曲线的非单调区间时，随着传播距离的增加，部分区域能够收到电磁信号，部分区域不能收到电磁信号，出现相互交叠的情况，此时采用栅格方式更能准确反映实际的电磁信号覆盖。

3.2.3 算法实现

采用栅格方式表征覆盖范围，需要首先确定电磁信号覆盖可能的区域，再对该区域进行栅格化，基于自适应电波传播衰减计算判断每个位置点对该电磁信号的接收情况，得到覆盖范围。

基于电磁波在自由空间中传播无媒介损耗的理论基础，可以利用自由空间衰减公式得到最大传播距离，再划分栅格进行计算。计算步骤如下：（1）根据发射功率、接收灵敏度，利用电磁波在自由空间传播衰减公式，计算最大传播距离；（2）根据发射机的方位覆盖区域和最大传播距离，按照一定的角度、距离步进，采用极坐标的形式进行栅格划分，得到不同方位、距离上的坐标点；（3）遍历每个坐标点，基于电波传播衰减自适应匹配计算，得到该点上的接收信号功率，判断该信号功率是否大于接收门限，若大于则标识该点被信号覆盖，否则标识未覆盖；（4）输出覆盖范围数据，采用不同颜色区分覆盖位置 and 未覆盖位置，在地图上显示。

3.3 包络方式的覆盖范围计算

相比栅格方式表征的覆盖范围，采用包络方式具有计算

量小、数据量小的特点，对范围的显示也更加简便高效。因此，除上一小节描述的需要用栅格方式表征覆盖范围的场景外，其余场景都采用包络方式表征。

包络方式的覆盖范围计算算法比栅格方式复杂，可根据使用的电波传播模型类型分为两种情况：一种情况是通过电波传播模型能够解析计算得到最大传播距离，此时遍历计算各个角度上的最大传播距离即可得到覆盖范围包络点；另一种情况是通过传播模型无法得到最大传播距离的解析解，由于包络方式针对的电波传播模型是随直线传播的距离增大而单调增大，可采用二分法得到最大传播距离。包络方式表征覆盖范围的计算步骤如下：（1）根据发射功率、接收灵敏度，利用电磁波在自由空间传播衰减公式，计算最大传播距离；（2）根据电磁波频率、收发平台类型、最大传播距离等，利用电波传播模型匹配规则进行电波传播模型匹配；（3）对发射机的角度覆盖范围，按照一定步长进行分割，利用匹配的电波传播模型，计算该方位上的最大传播距离（通过解析求解或采用二分法求解），同时结合地球视距、地形遮蔽进行判断，得到不同角度上该电磁信号的最大传播距离；（4）按照角度的顺序输出不同角度上最大传播距离处的坐标点，得到包络方式的覆盖范围。

4 算法实践

通过计算机软件实现基于自适应电波传播衰减计算的覆盖范围计算，在地图中进行显示，验证算法的有效性。

4.1 场景一：栅格方式覆盖范围-发射机下视

设置电磁信号频率为 16 GHz，发射机高度为 2000 m，要计算的高度层为 1500 m，发射机平台类型为空中平台，接收平台类型为陆地平台。

基于自适应电波传播衰减计算匹配到电波传播模型为 ITU-R P.2041 模型，由于发射机位置高于计算的高度层，根据地理高程数据，此高度层存在山峰遮挡，因此覆盖范围结果采用栅格形式表征。

计算结果如图4所示，图中白色填充区为电磁信号覆盖区域，可发现在范围轮廓中存在许多电磁信号无法覆盖的区域，这种场景覆盖范围适合栅格形式表征，计算结果与算法相符。



图4 场景一覆盖范围

4.2 场景二：包络方式覆盖范围 - 发射机上视

针对场景一的参数，改变发射机的高度为 1500 m，要计算的二维覆盖范围高度层为 1600 m。

发射机位置低于计算的高度层，且匹配的电波传播 ITU-R P.2041 模型衰减随距离是单调增加的，因此覆盖范围结果采用包络形式表征。计算结果如图 5 所示，图中白色包络线内部即为覆盖范围，包络形状与场景一轮廓基本一致，包络内部不存在电磁信号无法覆盖的区域，计算结果与算法相符。

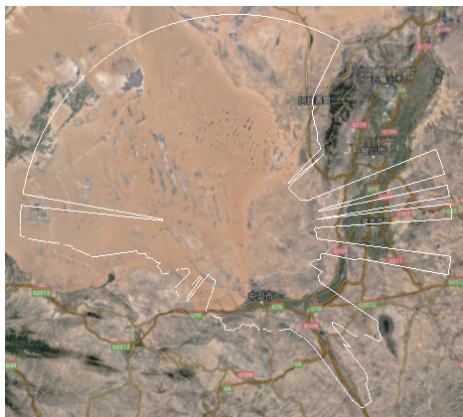


图 5 场景二覆盖范围

4.3 场景三：栅格方式覆盖范围 - 传播模型衰减不单调

针对栅格表征形式中的传播模型衰减不单调的情形，设置信号频率为 10 GHz，发射机高度为 500 m，要计算的高度层为 1500 m，发射机和接收平台类型均为陆地平台。

该场景匹配的传播模型为 Longley-Rice 传播模型，该模型衰减与直线传播距离不是单调的，因此即使发射机处于上视，覆盖范围仍然为栅格形式。计算结果如图 6 所示，在范围轮廓中存在许多电磁信号无法覆盖的区域，计算结果与算法相符。



图 6 场景三覆盖范围

5 总结

本文围绕电磁信号在空间中的覆盖范围准确表征和计算

方式，首先对各类型电波传播模型进行了自动匹配规则的设计，形成自适应电波传播衰减计算方法，降低了电波传播模型的使用门槛，提升了电波传播衰减预测的准确性。在此基础上，分类分析了电磁信号覆盖范围在不同场景下的表征形式，并结合自适应电波传播衰减设计相应的覆盖范围计算算法，实现复杂场景下电磁信号覆盖范围的准确计算。最后，通过计算机对设计的算法进行实践，实践结果表明，本文提出的基于电波传播模型的电磁信号覆盖范围计算方法能够更加真实准确地反映电磁信号的实际覆盖情况，在电磁信号覆盖范围分析中有非常重要的应用价值。

参考文献：

- [1] 卢玉刚, 刘玉珠, 王莹. GIS 在无线电波覆盖范围分析中的应用研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2017(8):153-155.
- [2] 闻映红. 天线与电波传播理论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [3] 韩鹏. 中近距离多波段无线电波传播建模与仿真 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [4] 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春. 雷达原理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2020:198-199.
- [5] 刘明. 地面通信站覆盖范围预测 [J]. 现代电子技术, 2012, 35(7): 53-56.
- [6] 康素成. 无线通信系统电波覆盖定量计算仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2019, 36(9):202-206.
- [7] 沈建潮. 基于 ITU-RP.1546 模型的小型无线电监测站监测覆盖范围研究 [J]. 中国无线电, 2011(2):59-60+69.
- [8] 芦伟东. 基于 ITU-RP.1546 建议书的电波传播仿真研究 [J]. 中国无线电, 2014(9):60-61.
- [9] 刘镇瑜, 郑全普. 一种地面电磁覆盖范围的可视化方法 [J]. 雷达科学与技术, 2018, 16(4):457-460.
- [10] LARRY F, NATHAN I. Path loss prediction over the lunar surface utilizing a modified longley-rice irregular terrain model[EB/OL].[2024-06-12]. <https://www.researchgate.net/publication/241494968>.
- [11] 徐文杰, 周新力, 吴龙刚. Longley-Rice 等效散射模型的建立 [J]. 无线电工程, 2011, 41(4):42-44.

【作者简介】

湛振华 (1991—)，男，四川广安人，硕士，工程师，研究方向：电磁传播与仿真分析。

(收稿日期：2024-07-12)