



研究与开发

非视距信号传播场强特性的分析与研究

宫峰勋, 张英

(中国民航大学通信工程系, 天津 300300)

摘要: 为探索机场通信路径中障碍物造成非视距传播产生衍射损耗, 对信号场强衰减特性进行了研究。首先, 基于 ITU-R P.1546 中不同地形环境对信号传播的影响, 结合 Deygout 模型构建信号场强组合模型。其次, 按障碍物数量分析随障碍物高度变化的接收场强传播特性。仿真结果表明, 单障碍物越高, 占据 $0.6F_1$ 菲涅尔区越大, 场强越小; 双障碍物路径中, 高度增加的障碍物经过由次要转为主要障碍物的过程, 直到只剩主要障碍物的过程, 使场强逐渐衰减。再次, 针对场强上升, 分析了次要障碍物高度与 $0.6F_1$ 菲涅尔区的关系。最后, 调整覆盖场强最小阈值, 确定接收设备是否被障碍物遮挡, 从而导致信号被屏蔽。上述研究结果可为未来模拟机场各场景下障碍物分布, 预测接收机是否因障碍物受干扰或影响场强覆盖范围提供参考依据。

关键词: 非视距传播; 障碍物; 菲涅尔区; 衍射损耗; 拟合场强

中图分类号: TN925

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024019

Analysis and research on propagation field strength characteristics of non-line-of-sight signal

GONG Fengxun, ZHANG Ying

Department of Communication Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract: In order to explore the diffraction loss caused by non-line-of-sight (NLOS) propagation caused by obstacles in the airport communication path, the attenuation characteristics of signal field were studied. Firstly, based on the influence of different terrain environments on signal propagation in ITU-R P.1546, a combined signal field strength model was constructed with Deygout model. Secondly, according to the number of obstacles, the propagation characteristics of the received field strength varying with the height of obstacles were analyzed. The simulation results show that the higher the single obstacle is, the larger the Fresnel zone occupying $0.6F_1$ is and the smaller the field strength is. In the dual obstacle path, the obstacle with increased height goes through the process of changing from secondary to main obstacle until only the main obstacle is left, so that the field strength gradually decreases. Thirdly, the relationship between secondary obstacle height and $0.6F_1$ Fresnel zone was analyzed for field strength rise. Finally, the minimum threshold of the covered field strength was adjusted to determine whether the receiving device was blocked by obstacles and the signal was shielded. The above research results can provide a reference for

收稿日期: 2023-09-30; 修回日期: 2023-12-13

通信作者: 宫峰勋, gxfcauc@sina.com; 张英, 3059116625@qq.com

基金项目: 科技部重点研发计划项目 (No.2018YFC0809500)

Foundation Item: The Key Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology (No.2018YFC0809500)



simulating the distribution of obstacles in various airport scenarios in the future, and predicting whether the receiver is interfered by obstacles or affects the field intensity coverage.

Key words: non-line-of-sight propagation, obstacles, Fresnel zone, diffraction loss, fitting field strength

0 引言

无线电波传播分为视距 (line of sight, LOS) 传播和非视距 (non-line-of-sight, NLOS) [1] 传播, 当无线电波没有遇到任何障碍时, 一切运行正常、顺畅。但是随着我国航空事业的不断蓬勃发展, 新建机场大多位于地形的复杂山区, 这些复杂山区通常具有较多障碍物, 使得无线电波的传播不再满足自由空间理想情况, 从而导致机场周边电磁传播环境愈加复杂。因此, 为了确保民用航空接收设备不受干扰实现空管领域安全飞行, 需要计算机场障碍物遮蔽引起无线电波传播损耗 [2] 以及分析障碍物改变时场强变化规律。

障碍物阻挡导致电波 NLOS 传播, 信号强度变弱、不稳定, 进而使场强估计误差增大, 从而干扰机场接收设备正常通信。2012 年, 张文波等 [3] 通过不同模型仿真的对比, 指出在飞行器控制通信系统中更适合采用 Longley-Rice 模型 [4] 点对点模式, 但是文献 [5] 指出在远距离接收区, 此模型相对确定性 Deygout [6-7] 几何衍射模型而言, 计算场强不太准确, Deygout 模型提出了更加精确的几何结构考虑多障碍物衍射并将其作为本文计算衍射损耗模型。2013 年, 佐磊等 [8] 分析菲涅尔余隙理论提出的双斜率对数距离路径损耗模型的精确度有所提高, 但只适用于单障碍物衍射情况, 没有对多障碍物损耗进行计算。本文使用菲涅尔参数来判断主、次障碍物并分别算出各自衍射损耗。2014 年, Kasampalis 等 [9] 通过将 Longley-Rice 模型、ITU-R P.1546 [10] 和 Hata-Davidson [11] 模型进行对比, 得出的 ITU-R P.1546 模型虽在较远距离上表现了更高的误差, 但无线电波传播路径有陆地、海上或者混合路径 [12], 不同的环境、路径、地形

高度、通信距离等因素都会造成信号不同程度的衰减。ITU-R P.1546 模型通过大量测量数据给出基于公式和图表的场强计算方法 [13]。2018 年, 全厚德等 [14] 以传播距离下相对余隙为判定条件, 利用多子模型预测电波传播损耗精度, 但是只考虑了电波传播方向, 忽略了障碍物大小、横向剖面、障碍物位置对电波传播的影响。2023 年, 王楠等 [15] 使用几何绕射方法分析电波传播特性, 但只是在计算传播损耗算法上进行了提升, 针对电波传播路径上障碍物的特性 (如障碍物高度), 没有具体研究障碍物高度变化时接收机处信号的衰减情况。

针对以上不足, 本文基于 ITU-R P.1546 模型中环境、路径、发射天线高度以及时间百分比等影响电波传播的因素, 结合 Deygout 衍射传播模型, 构建了信号场强估计组合模型, 对位于覆盖中心区域发射机至多个接收机的、具有多个障碍物路径中产生的传播损耗进行计算, 并对多个接收机处的接收场强曲线进行拟合, 分析场强衰减变化规律; 基于场强衰减到一定值出现上升的情况, 分析使得场强衰减趋势合理时次要障碍物高度与 $0.6F_1$ 菲涅尔区的关系; 根据通信系统要求设置信号强度覆盖 [16] 的阈值范围, 确定信号是否能被正常接收。通过模拟机场中单个或多个障碍物大小, 以及分布情况对障碍物变化时分析接收信号场强传播特性, 可以最大限度地减小障碍物引起的信号衰减和干扰, 满足不同应用场景对通信质量和覆盖范围的需求。

1 无线电波路径损耗和场强理论

无线电波遇到刃形障碍物会在上边缘发生衍射, 惠更斯—菲涅尔原理认为前进中障碍物上的

每一点作用相当于新波源产生二次子波。子波绕过障碍物进入后方形成衍射场强区域，部分能量未被接收，这引起衍射损耗导致场强衰减。

1.1 菲涅尔区理论

无线电波在传播过程中处于特高频频段，电波传播方式主要以衍射为主，使用菲涅尔区来计算障碍物产生的衍射损耗。菲涅尔区是连接在发射机至接收机之间的由点的轨迹形成的椭圆球体，菲涅尔区传播示意图如图 1 所示。

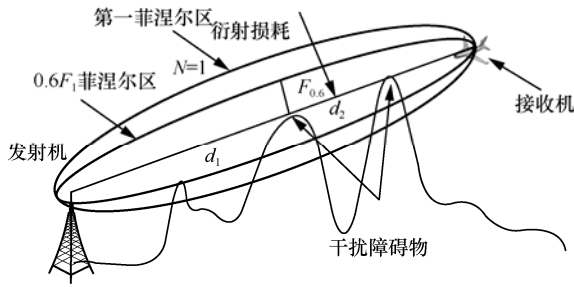


图 1 菲涅尔区传播示意图

远距离通信中第 n 个菲涅尔半径 F_n 远小于 d_1 和 d_2 ， F_n 可以近似由式 (1) 表示：

$$F_n = \left[n\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

传播损耗用菲涅尔参数 v 进行计算，由式 (2) 表示：

$$v = h \left[\frac{2}{\lambda} \cdot \frac{(d_1 + d_2)}{d_1 d_2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

定义相对余隙 v 由比值 h/F_n 来表示，见式 (3)：

$$v = h \left[\frac{2}{\lambda} \cdot \frac{(d_1 + d_2)}{d_1 d_2} \right]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{2} \frac{h}{F_1} \quad (3)$$

其中， h 表示障碍物顶部与发射机至接收机直线之间的高度（ h 值又称为传播余隙，可以是正也可以是负）， F_1 表示 $n=1$ 时第一菲涅尔半径， λ 表示波长， d_1 和 d_2 分别表示发射机和接收机沿水平方向至障碍物的距离。如果障碍物占据菲涅尔区，可以认为此区域中包含了电磁波的主要传播能量，那么可以计算出任意位置障碍物产生的衍射损耗 P_d ，由式 (4) ~ 式 (5) 表示：

$$F(v) = \frac{1}{4} + \frac{1}{2} [S^2(v) + C^2(v) - S(v) - C(v)] \quad (4)$$

$$P_d = 20 \lg \left[\frac{E_d}{E_0} \right] = 20 \lg [F(v)] \quad (5)$$

其中， $F(v)$ 表示菲涅尔积分， P_d 表示障碍物产生的衍射损耗（单位 dB）， E_0 表示自由空间场强， E_d 表示衍射场强， $C(v) = \int_0^v \cos\left(\frac{\pi}{2}x^2\right)dx$ ，

$S(v) = \int_0^v \sin\left(\frac{\pi}{2}x^2\right)dx$ 分别表示菲涅尔余弦积分和

正弦积分，最后计算 P_d ：

$$P_d = 3.01 - 10 \lg \left[\left(\frac{1}{2} - S(v) \right)^2 + \left(\frac{1}{2} - C(v) \right)^2 \right] \quad (6)$$

由此可见， P_d 值仅与 v 有关， P_d 与 v 关系，即衍射损耗随菲涅尔参数变化曲线如图 2 所示。

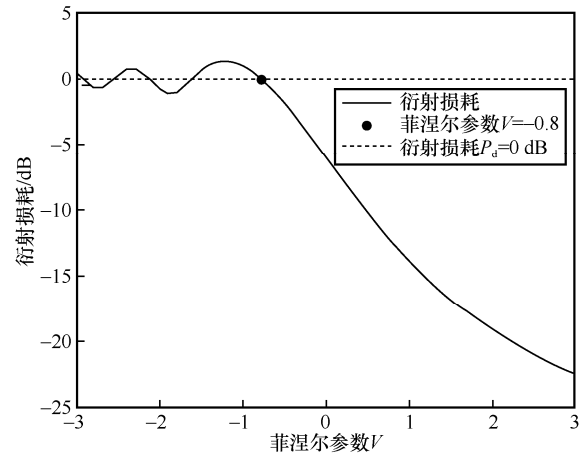


图 2 衍射损耗随菲涅尔参数变化曲线

从图 2 中可以看出，当 P_d 衰减为 0 时， v 为 -0.8 ，此时障碍物占据第一菲涅尔区的 0.6 倍，因此第一菲涅尔区的 0.6 倍区域被认为是畅通无阻的，如图 1 所示的菲涅尔半径 $F_{0.6}=0.6F_1$ 的区域，所以只需要考虑障碍物是否占据 $0.6F_1$ 菲涅尔区域以及在此区域的信号损耗衰减。

1.2 自由空间传播损耗理论

在无线电波传播的实际过程中，首先考虑自由空间中传播距离增加，能量产生扩散引起路径损耗，先预测路径中没有障碍物时的路径损耗 P_{path} ，由式 (7) 表示：



$$P_{\text{path}} = 32.44 + 20\lg d + 20\lg f \quad (7)$$

其中, f 表示发射频率, d 表示传播距离。可以看出, 无线电波在自由空间传输的过程中, 其 P_{path} 只与 f 和 d 有关, 并随着 d 逐渐增大, P_{path} 也随之增加。但是多路径通信及其环境的其他因素都会对接收处的信号场强造成影响, 考虑路径、环境、时间百分比 t 、发射天线高度 h_1 等对电波传播造成衰减, 本文加入了 ITU-RP.1546 模型^[10]进行分析。此模型是基于经验模型导出的场强曲线, 是关于 d 、 h_1 、 f 和 t 的函数。 h_1 由路径距离、类型以及有效高度信息来决定。如果没有地形形态信息, h_1 由式 (8) 表示:

$$h_1 = \begin{cases} h_{\text{ant}}, d < 3 \text{ km} \\ h_{\text{ant}} + \frac{(h_{\text{eff}} - h_{\text{ant}}) \cdot (d - 3)}{12}, 3 \leq d < 15 \text{ km} \end{cases} \quad (8)$$

如果有地形形态信息, h_1 由式 (9) 表示:

$$h_1 = \begin{cases} h_b, d < 15 \text{ km} \\ h_{\text{eff}}, d \geq 15 \text{ km} \end{cases} \quad (9)$$

其中, h_{ant} 表示大地上方天线的桅杆高度; h_{eff} 表示发射天线的有效高度, 对于陆地路径中定义为在接收天线方向上距离发射天线 3~15 km 的地面平均高度; h_b 表示天线在 $0.2d \sim d$ 传播距离的地面平均高度的上方高度, 该模型在 1 000 MHz, 陆地-开放路径, 50%时间百分比条件下, 场强传播曲线如图 3 所示。

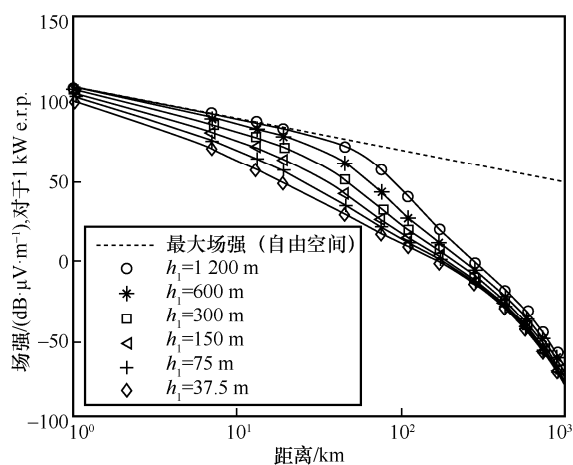


图3 场强传播曲线

图 3 是针对开放的陆地路径中对不同 h_1 在有效辐射功率 **ERP** 为 1 kW 下的空间场强。场强随传播距离增加一直降低, 通过提高发射天线高度可较小程度降低场强衰减。同时, 由于所研究发射机 **ERP** 不同, 计算与场强相等的等效基本传输损耗 P_e 由式 (10) 表示:

$$P_e = 139.3 - E + 20\lg f \quad (10)$$

其中, E 表示 **ERP** 为 1 kW 时的场强值。不同传播环境、路径、时间以及发射天线高度都会对接收场强产生影响。

1.3 NLOS 传播损耗理论

NLOS 传播中刃形障碍物计算 P_d 都基于菲涅尔—基尔霍夫光学理论, 如果障碍物占据 $0.6F_1$ 菲涅尔区, 则采用适当传播模型利用 v 来计算障碍物产生 P_d 。按照路径中障碍物数量分别进行讨论。

1.3.1 单障碍物传播模型理论

当传播路径上只有单个障碍物时, 单个障碍物传播模型如图 4 所示, 无线电波的 P_d 由式 (4)~式 (6) 给出, 为了计算方便, 根据文献[17]按照 v 的区间范围来计算 P_d , 由式 (11) 表示:

$$\begin{aligned} P_d &= 0, v \leq -1 \\ P_d &= 20\lg[0.5 - 0.62v], -1 < v \leq 0 \\ P_d &= 20\lg[0.5e^{-0.95v}], 0 < v \leq 1 \\ P_d &= 20\lg\left[0.4 - \left((0.1184 - (0.38 - 0.1v)^2)^{\frac{1}{2}}\right)\right], 1 < v \leq 2.4 \\ P_d &= 20\lg\left[\frac{0.225}{v}\right], v > 2.4 \end{aligned} \quad (11)$$

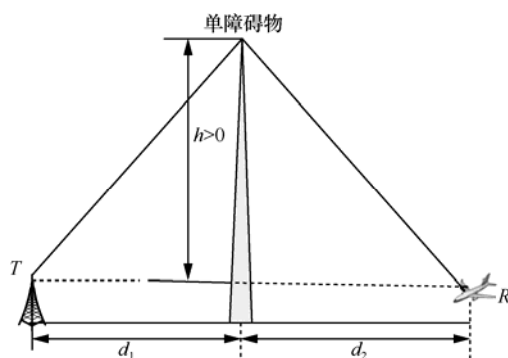


图4 单传播模型

1.3.2 双障碍物传播模型理论

无线电波在不规则地形进行远距离通信时, 路径中往往存在多个障碍物^[18], 障碍物越多、影响信号场强衰减越显著。根据文献[5]可知, Deygout 模型在距离发射机远时, 计算 P_d 比其他多重衍射模型而言结果更准确, 所以本文采用 Deygout 模型对双障碍物遮挡产生 P_d 进行分析。计算各障碍物的 v , 最大菲涅尔参数 $v_{\max}$ 为主要障碍物, 最小 $v_{\min}$ 为次要障碍物。双障碍物传播模型 1 和模型 2 如图 5、图 6 所示。

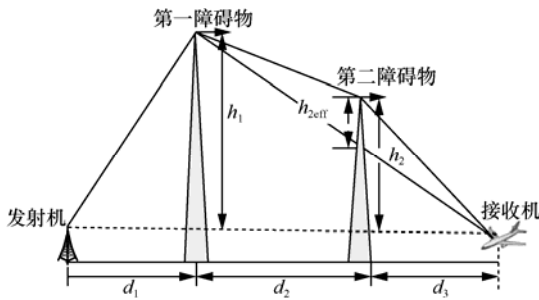


图 5 双障碍物传播模型 1

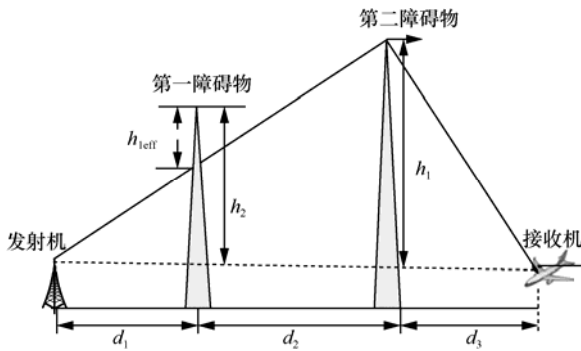


图 6 双障碍物传播模型 2

图 5 中第一障碍物作为主要障碍物产生的衍射损耗 P_{d1} 独立计算, 第二障碍物作为次要障碍物造成的衍射损耗 P_{d2} , 需要考虑传播路径中第一障碍物顶部作为波源到达接收机的第二障碍物有效高度 $h_{2\text{eff}}$, 此时第一障碍物菲涅尔参数 v_1 和第二障碍物菲涅尔参数 v_2 分别用函数式 (12) ~ 式 (13) 表示:

$$v_1 = P(h_1, d_1, d_2 + d_3) \quad (12)$$

$$v_2 = P(h_{2\text{eff}}, d_2, d_3) \quad (13)$$

图 6 中第二障碍物为主要障碍物时, 衍射损耗 P_{d2} 是主要损耗, 独立计算, 作为次要障碍物的

第一障碍物, 衍射损耗 P_{d1} 考虑发射机到第二障碍物之间的第一障碍物有效高度 $h_{1\text{eff}}$, v_1 和 v_2 分别用式 (14) ~ 式 (15) 表示:

$$v_1 = P(h_{1\text{eff}}, d_1, d_2) \quad (14)$$

$$v_2 = P(h_2, d_1 + d_2, d_3) \quad (15)$$

最后, 将两个障碍物分别产生的 P_{d1} 、 P_{d2} 进行叠加计算路径中总衍射损耗 $P_{d\text{-total}}$ 。

1.4 信号场强理论

定义某个位置接收机的全向天线接收功率为 P_r , 由式 (16) 表示:

$$P_r = \frac{E^2 \left(\frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \right)^2}{Z_0} \quad (16)$$

其中, G_r 表示天线增益 (数值), Z_0 表示自由空间阻抗 120π 或 377Ω , E 表示信号强度 (单位: V/m), 用 $c = \lambda \cdot f$ 代替, 可得式 (17):

$$P_r = \left(\frac{2250}{377\pi} \right) \cdot \left[\frac{E}{f} \right]^2 \cdot G_r \cdot 10^{-8} \quad (17)$$

将式 (7) 两边取对数并使 $G_r=0$, 用 $P_r=P_t-P_{\text{total}}$ 进行化简, 以 dB 为单位, 可得式 (18):

$$E = P_t - P_{\text{total}} + 20 \lg f + 77.2 \quad (18)$$

其中, P_t 表示有效全向辐射功率 EIRP, P_{total} 表示路径中 P_e 和 $P_{d\text{-total}}$ 叠加后的总损耗。依据文献[9]中距离远于 40 km 的接收机点, 通过将第 1.2 节、第 1.3 节模型与组合模型研究方法计算特定处场强进行对比, 研究模型对比如图 7 所示, 考虑不同环境后的组合模型对信号强度造成的衰减多一些。

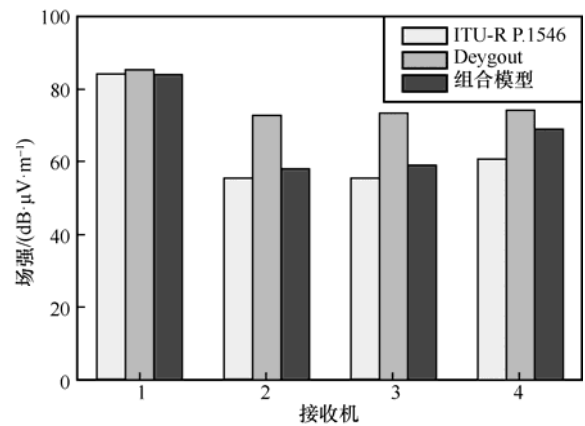


图 7 研究模型对比



2 多障碍物场强衰减分析

要分析多个接收机处场强随障碍物改变的变化规律,需要先确定最大传输距离为 100 km,使用圆形栅格法^[19]计算自由空间中每个网格点对应损耗值和该区域场强分布并设置障碍物的位置,障碍物、接收机位置示意图如图 8 所示,将第一障碍物设置在 X_1 (-20 000, 15 000) 至 X_1 (20 000, 15 000),第二障碍物位于 X_2 (-10 000, 25 000) 至 X_2 (10 000, 25 000),采用场强组合传播模型,计算位于第一障碍物和第二障碍物后方的多个接收机场强值。

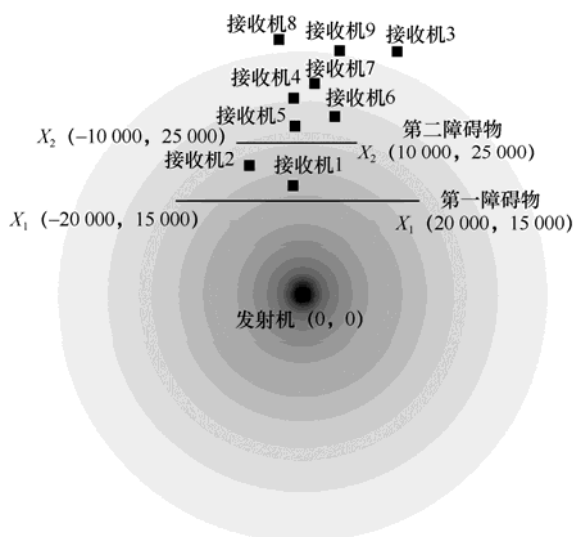


图 8 障碍物、接收机位置示意图

2.1 场强随障碍物高度的变化趋势

仿真测试条件根据一般的地形形态设置 $h_{\text{eff}}=200$ m 和 $h_b=180$ m, 根据式 (8) ~ 式 (9) 计算 h_1 , 接收天线高度 $h_2=10$ m, $t=50\%$, P_t (EIRP) = 79 dBm, 机场多点定位通信系统中无线电波传播 $f=1\,000$ MHz, 路径和环境分别选择陆地和开放地区。首先当第二障碍物高度 height_2 为 100 m、70 m, 第一障碍物高度 height_1 变化时, 对各接收机得出的场强曲线进行拟合。考虑地球曲率 $R=(d_1 \cdot d_2 / 2 \cdot K \cdot R_0)$ 的影响, 其中因子 $K=4/3$, R_0 表

示地球实际半径为 6 370 km, 第一障碍物的起始高度要大于该位置的地球曲率 R 。不同第二障碍物高度下, 第一障碍物高度变化的场强拟合曲线如图 9 所示。

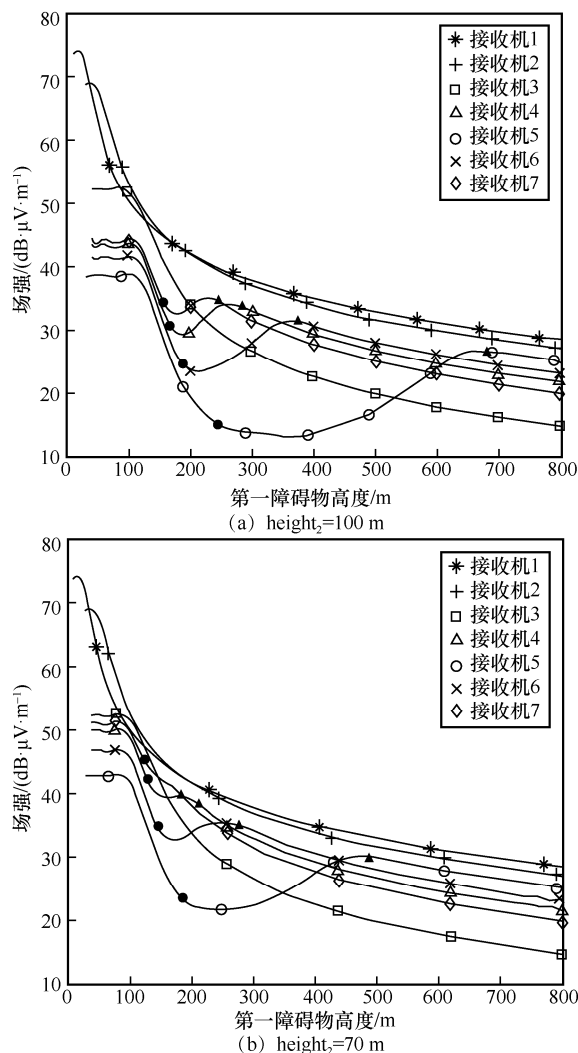


图 9 不同第二障碍物高度下, 第一障碍物高度变化的场强拟合曲线

由图 9 (a)、图 9 (b) 可以分析各个接收机曲线的变化规律, 图 9 中实心圆点代表双障碍物场强曲线主、次障碍物的转变点, 实心三角点代表次要障碍物衍射损耗减为 0 dB。对于接收机 1、接收机 2、接收机 3, 路径中只有单个障碍物, 即第一障碍物, 并且当第一障碍物没有进入 $0.6F_1$ 菲涅尔区时属于 LOS 传播, 这段的场强值随着 height_1 增加不发生改变, 此时的场强为发射时的

信号强度减去如图 3 所示的自由空间中传播距离扩散损耗。 $height_1$ 越来越高开始占据 $0.6F_I$ 菲涅尔区并越来越大,障碍物产生的 P_{d1} 也越来越大,场强呈现快速减小的趋势,并且由于接收机 1 和接收机 2 位于障碍物后方很近,拟合后的场强很快就开始衰减。同时,这 3 个接收机的传播路径中只有第一障碍物,与第二障碍物无关,所以针对 $height_2$ 为 70 m 的情况,对应的场强拟合曲线是一致的。

对于接收机 4、接收机 5、接收机 6、接收机 7 来说,路径中有第一、第二两个障碍物。同样发现,当 $height_1$ 增加至未进入以及进入 $0.6F_I$ 菲涅尔区,此时第二障碍物作为主要障碍物, h_{1eff} (负值) 很小,此段场强在 $height_1$ 变化过程中第一障碍物不会产生 P_{d1} , 并且第二障碍物的各种参数都不变,相当于只有固定高度的第二障碍物存在,场强没有发生改变。 $height_2$ 越高,场强值越低。 $height_1$ 继续增加,第一障碍物开始产生 P_{d1} 并逐渐增大,场强开始快速下降。当 $height_1$ 增加至实心圆点后,第一障碍物变为主要障碍物, P_{d1} 一直在持续增加,但是增加 $height_1$ 导致 h_{2eff} 减小,直至第二障碍物产生次要损耗减为 0,此段场强会因两者损耗叠加出现下降或者波动起伏情况。最后, $height_1$ 继续增加至实心三角点后,路径中只有主要障碍物,即只有第一障碍物产生 P_{d1} 降低场强。为了分析第二障碍物对场强影响,针对 $height_1$ 为 150 m、125 m, $height_2$ 变化时,再次对各个接收机的场强曲线进行拟合。由于接收机 1、接收机 2、接收机 3 的路径中 P_{d1} 与第二障碍物无关,此 3 点接收场强不会随着 $height_2$ 增加而改变,不对三者进行仿真。不同 $height_1$ 下, $height_2$ 变化的场强拟合曲线如图 10 所示。

图 10 (a)、图 10 (b) 中拟合场强曲线和上述传播路径中具有两个障碍物的接收场强曲线变化一致,对应主、次障碍物及其产生衍射损耗与上述分析正好相反。观察图 8 中接收机位置可知,接收机 5 位于第二障碍物后方最近的位置, $height_2$ 增加对接收机 5 的影响最大,从而导致接

收的信号强度最小。同样可以说明,当位于障碍物后方距离接收机越近,障碍物遮挡作用越明显。最后,衍射损耗曲线在 v 很大时损耗增加得缓慢,场强也随主要障碍物高度继续增加,再较为缓慢地降低。

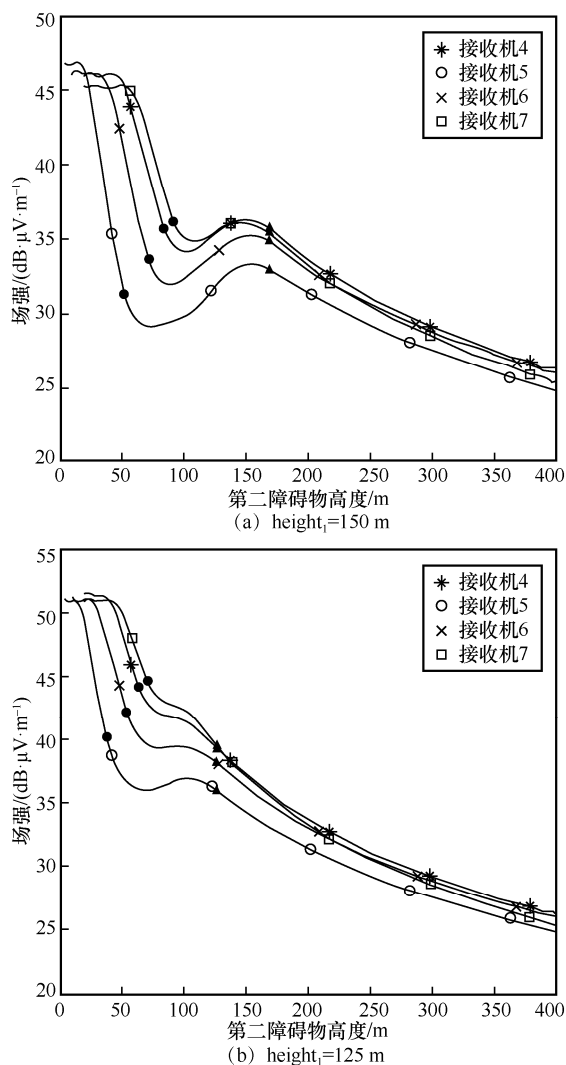


图 10 不同第一障碍高度下,第二障碍物高度变化的场强拟合曲线

2.2 次要障碍物高度对场强的影响

根据实际损耗衰减理论,无论是哪个障碍物,只要障碍物高度增加,最后的场强一定随着障碍物的高度变高而呈现降低的趋势,但是通过观察图 9、图 10,路径中存在两个障碍物的接收机 4~接收机 7 的拟合场强曲线中,两个实心圆点之间出现了波动起伏上升的过程,这与实际的场强衰



减理论出现了矛盾。接下来首先对这 4 个接收机在第二障碍物高度不同下场强随着 $height_1$ 改变的情况进行仿真。

第二障碍物不同高度时接收机 4、接收机 5、接收机 6、接收机 7 的场强曲线如图 11 所示。

图 11 中, 对比不同 $height_2$ 接收场强曲线, 当 $height_1$ 增至第一障碍物为主要障碍物后, 路径中存在双障碍物时第一、第二障碍物与上半部分 $0.6F_1$ 菲涅尔区的纵轴交点见表 1。根据表 1, 如果曲线上两实心点间对应的 $P_{d-total}$ 出现极大极小值且差值不超过 1 dB 左右时, 当 $height_2$ 处于上半部分 $0.6F_1$ 菲涅尔区时, 接收机 4 在 $height_2$ 为

40 m、60 m、70 m 场强曲线处于减小状态; 接收机 5 在 $height_2$ 为 20 m、30 m、35 m 的场强减小, 接收机 6 在 $height_2$ 为 40 m、50 m 的场强曲线呈现下降趋势; 接收机 7 在 $height_2$ 为 40 m、60 m、80 m、90 m 时, 这些场强曲线都符合实际场强衰减理论, 但 $height_2$ 高于此交点场强会呈现上升趋势与实际理论不符。

为了验证上述限制次要障碍物高度的结果, 再次对第一障碍物不同高度下场强随 $height_2$ 改变得到的场强曲线进行仿真。同样, 当 $height_2$ 增加至第二障碍物变为主要障碍物后, 如果场强曲线中出现衍射损耗极大值、极小值且其差值不超过

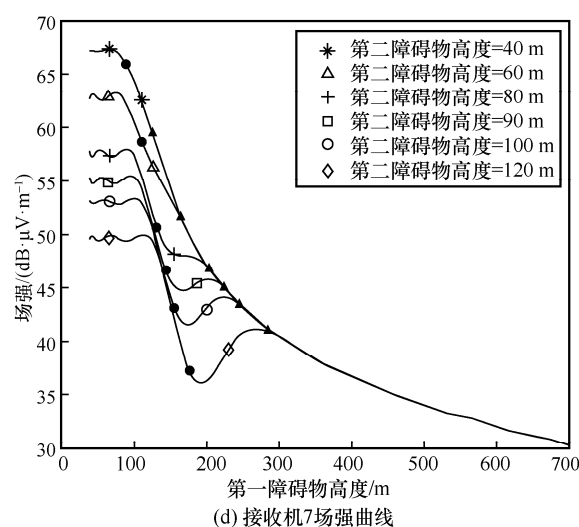
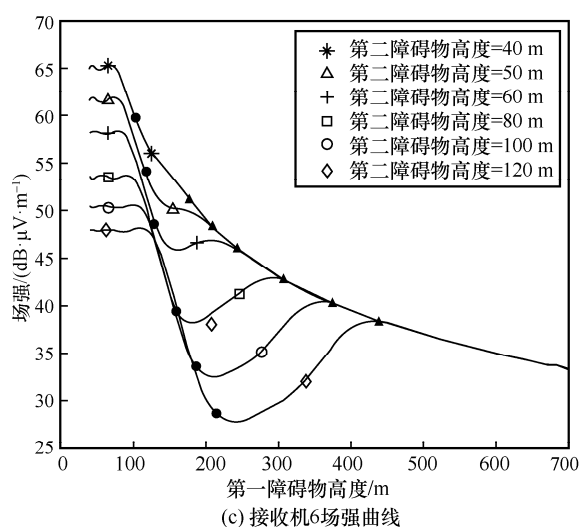
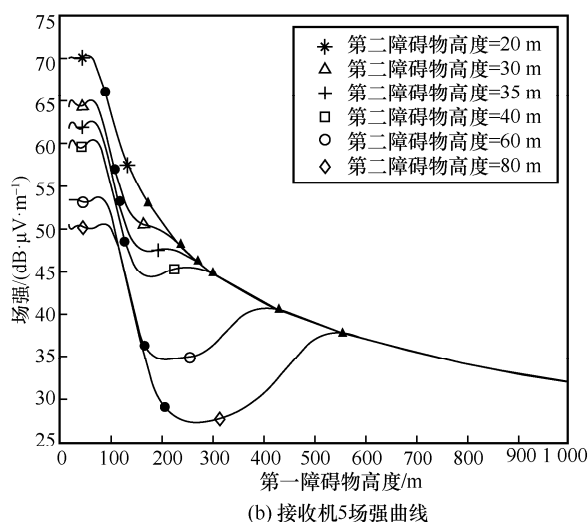
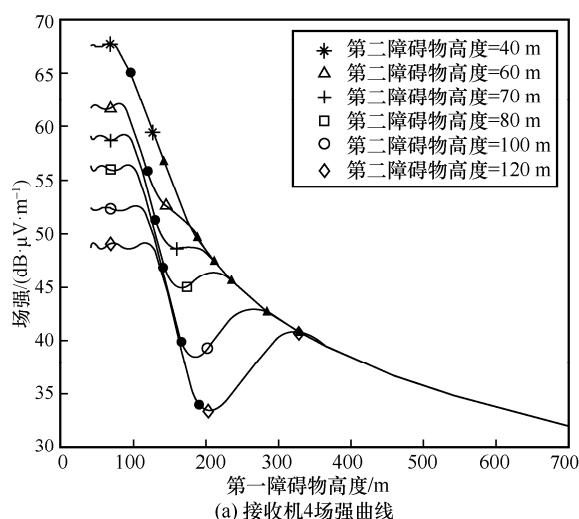


图 11 第二障碍物不同高度时接收机 4、5、6、7 的场强曲线

表 1 路径中存在双障碍物时第一、第二障碍物与上半部分 $0.6F_1$ 菲涅尔区的纵轴交点

发射机-接收机	第二障碍物与上半部分 $0.6F_1$ 菲涅尔区纵轴交点高度/m	第一障碍物与上半部分 $0.6F_1$ 菲涅尔区纵轴交点高度/m
接收机 4	78	142
接收机 5	37	121
接收机 6	59	132
接收机 7	92	149
接收机 8	68	144
接收机 9	58	140

1 dB 左右, 发射机至接收机的路径中次要障碍物第一障碍物高度小于表 1 中第一障碍物与上半部分 $0.6F_1$ 菲涅尔区的纵轴交点高度, 因而可知仿真

得到拟合场强曲线合理。

第一障碍物不同高度时接收机 4、接收机 5、接收机 6、接收机 7 的场强曲线如图 12 所示。

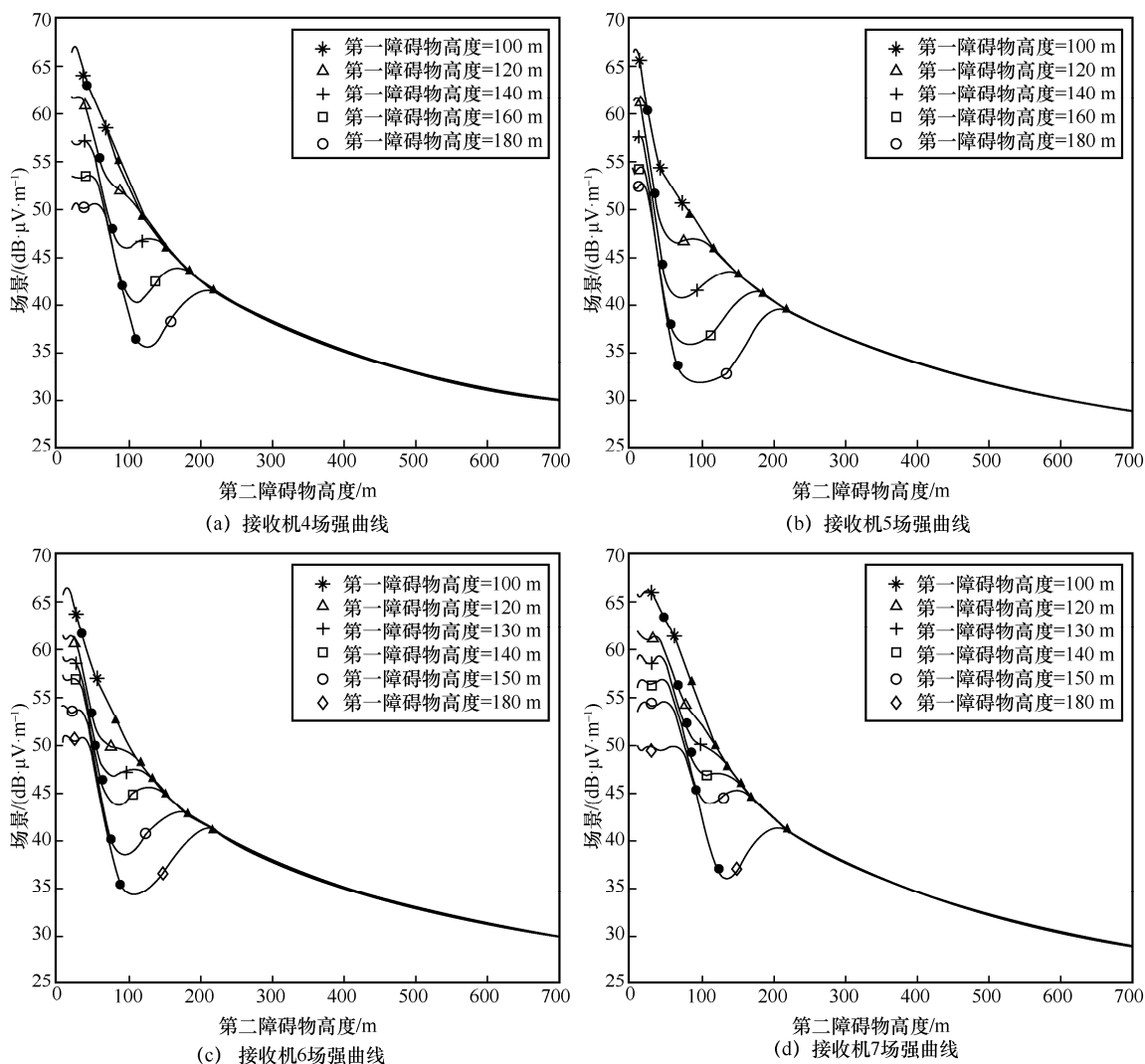


图 12 第一障碍物不同高度时接收机 4、接收机 5、接收机 6、接收机 7 的场强曲线



通过以上分析可得出高度变化的障碍物转变为路径中的主要障碍物后,次要障碍物高度太高超过 $0.6F_1$ 菲涅尔区上半部分, Deygout 模型计算的次要障碍物衍射损耗要比实际产生的损耗小,导致图 12 中的场强衰减到主、次障碍物的转变后出现上升的情况。次要障碍物高度与 $0.6F_1$ 菲涅尔区关系如图 13 所示,接收机位置不同,高度变化障碍物与 $0.6F_1$ 菲涅尔区交点不一。根据障碍物和接收机位置,如果场强衰减曲线上出现两实心点之间对应衍射损耗极大极小值差值不超过 1 dB 左右,路径中限制次要障碍物高度低至处于上半部分 $0.6F_1$ 菲涅尔区之下,这时利用模型计算衍射损耗随着障碍物高度增加逐渐降低的场强曲线与实际场强衰减理论相符合。

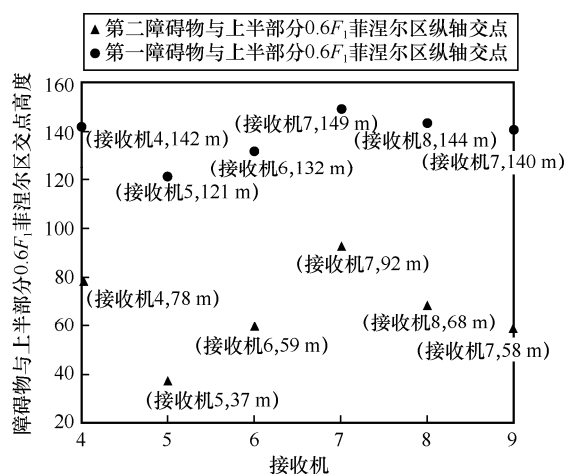


图 13 次要障碍物高度与 $0.6F_1$ 菲涅尔区关系

为验证发射机处于覆盖中心区域下场强衰减特性普适性,不改变障碍物大小,模拟第一、第二障碍物分别位于 20 km、35 km 位置,如图 13 所示,接收机 8、接收机 9 是障碍物位置改变后、次要障碍物与上半部分 $0.6F_1$ 菲涅尔区的交点高度值。为确保场强曲线处于下降趋势,选取接收机 8、接收机 9 路径中第二障碍物与上半部分 $0.6F_1$ 菲涅尔区最小纵轴值,设置 $height_2=50$ m,观察 $height_1$ 变化时接收场强衰减特性。障碍物位置改变后场强衰减曲线如图 14 所示。

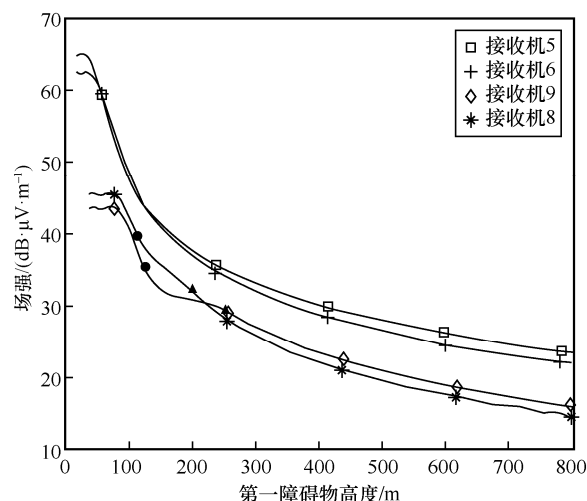


图 14 障碍物位置改变后场强衰减曲线

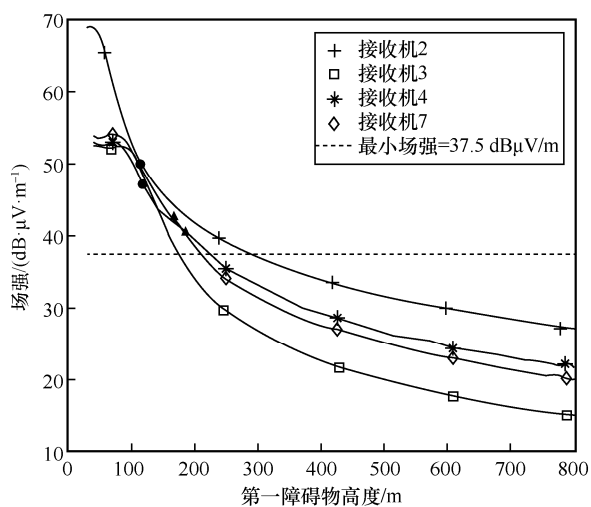
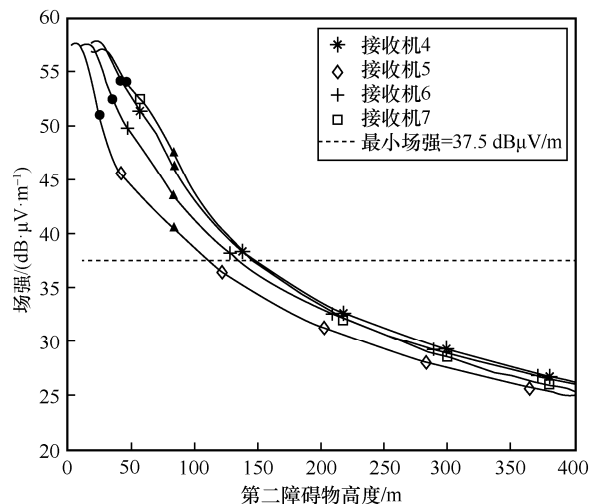
结果表明,尽管障碍物间隔、位置改变,但接收场强传播特性仍按照接收机 5 和接收机 6 路径中只有第一障碍物的情况,随 $height_1$ 单阶段衰减。在接收机 8 和 9 的双障碍路径中,随 $height_1$ 增加,第一障碍由次要作为主要障碍物,直至只有第一障碍物产生损耗的 3 个阶段,持续使场强衰减。

2.3 一定阈值场强下的信号接收

基于场强衰减合理时,在 $height_1$ 变化时,为避免接收机位于障碍物后方太近的距离从而对障碍物高度设置过低,选取图 8 中的接收机 2、接收机 3、接收机 4、接收机 7 进行仿真, $height_2=60$ m $height_1$ 变化场强曲线如图 15 所示。在 $height_2$ 变化时仍对路径存在双障碍物接收场强仿真, $height_1=100$ m $height_2$ 变化场强曲线如图 16 所示。按机场基站 $P_t=1000$ W, 即 60 dBm, $G_r=10.15$ dBi, 接收信号最低覆盖强度为 37.5 dBμV/m, 分别取 $height_2=60$ m 对 $height_1$ 变化和 $height_1=100$ m 对 $height_2$ 变化场强曲线进行仿真。

图 15、图 16 是基于合理场强下降趋势的场强曲线。不难发现,在图 15 中,由于接收机 3 距离发射机最远,因而在自由空间中由于传播距离、环境路径等因素产生更大的路径损耗使得场强值最低,即传播距离越远路径中地形、环境等因素

会造成信号场强值更低。同时,在图 16 中,观察到位于障碍物后方比较近的接收处电场强度较低,而远离障碍物的地方电场强度较高,这是因为接收机距离障碍物后方越近,障碍物占据 $0.6F_1$ 菲涅尔区越大,进而引起的衍射损耗越大场强值越低,即接收机位于障碍物位置后方越近,高大的障碍物会在其背后形成阴影区域,该区域的信号强度较低。障碍物越密集越高大,信号的衰减程度越大。因此,在城市中的建筑群或者山谷中的信号传播路径更容易受到强烈遮挡。同时,根据场强传播特性曲线,当高度变化的障碍物刚开始完全占据 $0.6F_1$ 菲涅尔区的过程中,随着障碍物越高对信号传输的遮挡程度越严重,信号场强急剧衰减。对于路径中存在双障碍时,虽然场强衰减速度会有所减缓,但高度持续增加的障碍物会作为主要障碍物持续使信号强度降低,直至路径中只有主要障碍物并随其增高而缓慢降低场强。虽然次要障碍物产生的衍射损耗较低,但同一主要障碍物高度下,次要障碍物高度越高则信号场强值越低。当调整最小接收场强的覆盖范围后,位于此位置的障碍物高度增高,使场强曲线处于最低覆盖范围以下的信号衰减严重,障碍物后方的接收设备已经完全收不到信号,接收设备受到干扰。

图 15 $height_2=60\text{ m}$ $height_1$ 变化场强曲线图 16 $height_1=100\text{ m}$ $height_2$ 变化场强曲线

因此,可以通过场强衰减变化规律和信号的覆盖需求,根据机场中障碍物的位置以及高度来确定障碍物遮挡是否会影响信号质量的接收,并考虑通过一定的方法,如合理确定天线的高度和安装位置,最大限度地减小障碍物引起的信号衰减,提高无线通信系统性能。

3 结束语

本文考虑 ITU-R P.1546 模型中传播环境、路径距离、地形高度等因素,结合 Deygout 衍射模型构建场强组合模型,分析了障碍物衍射引起的路径损耗对场强的影响以及场强衰减特性。研究结果适用于发射机位于不同环境和地形的通信中心区域场景,传播路径存在单障碍物时由于该障碍物高度变高直至完全占据 $0.6F_1$ 菲涅尔区,对信号传播遮挡严重,场强一直在降低;然而双障碍物路径中场强衰减特性会经历高度变化障碍物作为次要障碍物、主要障碍物,以及只有高度变化障碍物作为主要障碍物的 3 个复杂阶段,导致信号场强衰减得越来越严重;并且接收机位于障碍物后方越近,信号衰减越快,场强值越低;基于双障碍物路径中主、次障碍物发生转变后,由于 Deygout 模型计算次要障碍物损耗偏低,导致场强曲线上升,如果场强衰减曲线衍射损耗极大和极



小值差值不超过 1 dB 左右, 保证分析场强衰减趋势合理需要限制次要障碍物高度处于上半部分 $0.6F_1$ 菲涅尔区以下区域; 基于分析合理场强传播特性曲线以及特定场强覆盖阈值, 确定布设的障碍物位置和高度是否可使接收机接收足够强度的信号, 避免飞机通信中断无法建立稳定的连接。因此, 正确分析不同场景中信号在传播过程中场强衰减特性, 可以避免障碍物产生的阴影区域对信号质量产生干扰, 对保障飞机运行安全至关重要。对未来研究不同频率下障碍物变化对场强传播的影响, 为无线通信系统的设计提供更全面的参考。

参考文献:

- [1] 杨丽花, 刘加欢, 任露露, 等. 室内办公室高频段信道测量和大尺度衰落建模[J]. 北京邮电大学学报, 2022, 45(1): 7-12.
YANG L H, LIU J H, REN L L, et al. High frequency broadband channel measurement and large scale fading modeling in indoor office scenario[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022, 45(1): 7-12.
- [2] PHILLIPS C, SICKER D, GRUNWALD D. A survey of wireless path loss prediction and coverage mapping methods[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(1): 255-270.
- [3] 张文波, 曹耀钦. 电磁环境仿真中电波传播模型研究及仿真分析[J]. 电波科学学报, 2012, 27(3): 538-542, 550.
ZHANG W B, CAO Y Q. Research and simulation analysis on radio propagation model in electromagnetic environment simulation[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2012, 27(3): 538-542, 550.
- [4] LONGLEY A G, RICE P L. Prediction of tropospheric radio transmission loss over irregular terrain[J]. A Computer Met-Hod.1968.
- [5] KASAMPALIS S, LAZARIDIS P I, ZAHARIS Z D, et al. Longley-Rice model prediction inaccuracies in the UHF and VHF TV bands in mountainous terrain[C]//Proceedings of the 2015 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [6] DEYGOUT J. Multiple knife-edge diffraction of microwaves[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1966, 14(4): 480-489.
- [7] DEYGOUT J. Correction factor for multiple knife-edge diffraction[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1991, 39(8): 1256-1258.
- [8] 佐磊, 何怡刚, 李兵, 等. 无源超高频射频频识别系统路径损耗研究[J]. 物理学报, 2013, 62(14): 150-157.
ZUO L, HE Y G, LI B, et al. Analysis and measurements of path loss effects for ultra high frequency radio-frequency identification in real environments[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(14): 150-157.
- [9] KASAMPALIS S, LAZARIDIS P I, ZAHARIS Z D, et al. Comparison of Longley-Rice, ITU-R P.1546 and Hata-Davidson propagation models for DVB-T coverage prediction[C]//Proceedings of the 2014 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-4.
- [10] ITU. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz: ITU-R P.1546-5[S]. 2013.
- [11] OLIVEIRA R, SOUZA J, MAGNO F, et al. Application of Parabolic Equation and Hata-Davidson propagation models for digital TV coverage prediction[C]//Proceedings of the 2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [12] 董浩, 宋亮, 化存卿, 等. 海上通信技术发展与研究综述[J]. 电信科学, 2022, 38(5): 1-17.
DONG H, SONG L, HUA C Q, et al. Review on development and research of maritime communication technology[J]. Telecommunication Science, 2022, 38(5): 1-17.
- [13] 韩慧, 郝玉龙, 杨铨, 等. 基于抛物方程的无人机通信场景传播特性分析[J]. 电信科学, 2022, 38(8): 45-53.
HAN H, HAO Y L, YANG C, et al. Analysis of UAV Communication scenario Propagation characteristics based on Parabolic equation[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(8): 45-53.
- [14] 全厚德, 兰田, 孙慧贤, 等. 多子模型方法预测电波传播损耗研究[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(9): 94-98.
QUAN H D, LAN T, SUN H X, et al. Research on multi-model methods in predicting radio wave propagation loss[J]. Fire Control & Command Control, 2018, 43(9): 94-98.
- [15] 王楠, 刘俊志, 陈贵齐, 等. 电大山区地物环境中电波传播的电磁计算[J]. 西安电子科技大学学报, 2023, 50(4): 1-9.
WANG N, LIU J Z, CHEN G Q, et al. Electromagnetic calculation of radio wave propagation in terrain environment of Dada Mountain area [J]. Journal of Xidian University, 2023, 50(4): 1-9.
- [16] 冯克涛, 李晓毅, 曲晨, 等. 基于 DEM 的民航地空 VHF 通信有效覆盖仿真研究[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(2): 684-695.
FENG K T, LI X Y, QU C, et al. Simulation research on effective coverage of civil aviation ground to air VHF communication based on DEM[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(2): 684-695.

- [17] LEE W C Y. Mobile cellular telecommunications: analog and digital systems[M]. New York: McGraw-Hill Professional, 1995: 137-139.
- [18] 朱秋明, 黄攀, 陈学强, 等. 月表环境无线电波传播分段预测模型[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(2): 116-120.
ZHU Q M, HUANG P, CHEN X Q, et al. A new segment prediction model for radio propagation over lunar surface[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, 46(2): 116-120.
- [19] 汤新民, 张颖, 胡钰明, 等. 基于网格划分的 ADS-B 地面站信号覆盖及选址分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(6): 1114-1120.
TANG X M, ZHANG Y, HU Y M, et al. Analysis on signal coverage and site selection for ADS- B ground station based on grid division[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(6): 1114-1120.

[作者简介]



宫峰勋(1965—), 男, 中国民航大学通信工程系教授、硕士生导师, 主要研究方向为电磁辐射与电磁兼容、民航通信导航监视及多源数据融合等。



张英(1999—), 女, 中国民航大学通信工程系硕士生, 主要研究方向为电磁兼容与无线电。