

DOI:10.20079/j.issn.1001-893x.221008003

极低频电流场透地通信路径损耗建模与分析*

徐 湛¹, 温晓雯², 张 淦³

(1. 北京信息科技大学 信息与通信工程学院, 北京 100101; 2. 北京信息科技大学 自动化学院, 北京 100192;
3. 中国矿业大学(北京) 机电与信息工程学院, 北京 100083)

摘要:针对水平方向地电极电流场无线强穿透信息传输需求,研究了基于极低频水平双电极电流场信道传输特性。考虑到电极半径、电极入土深度、电极间距、发射信号频率和信号传输距离等参数对透地(Through-The-Earth, TTE)通信传输性能的影响,建立了地电极电流场 TTE 通信路径损耗模型,分析了各参数对路径损耗的影响,确定了信号传输最佳工作参数。根据选定参数搭建了极低频电流场 TTE 通信系统,在 200 m 和 400 m 通信距离下测试了 3~10 Hz 信号的路径损耗,通过试验数据与仿真结果对比分析验证了模型的准确性。

关键词:隧道救援;透地通信;地电极电流场;极低频;路径损耗模型

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



微信扫描二维码
听独家语音释文
与作者在线交流
享本刊专属服务

中图分类号:TN929.4 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2024)03-0376-06

Path Loss Modeling and Analysis Based on Extremely Low Frequency Current Field Through-The-Earth Communications

XU Zhan¹, WEN Xiaowen², ZHANG Gan³

(1. School of Information and Communication Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China;

2. School of Automation, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;

3. School of Mechatronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: For the problem of wireless strong penetration information transmission requirement of horizontal ground electrode current field, the transmission characteristics of horizontal two-electrode current field channel based on extremely low frequency are studied. Considering the influence of electrode radius, electrode depth, electrode spacing, transmitting signal frequency and signal transmission distance on transmission performance of Through-The-Earth (TTE) communications, the TTE communication path loss model based on the current field of the ground electrode is established, the influence of various parameters on the model is analyzed, and the optimum working parameters of signal transmission are determined. According to the selected parameters, a TTE communication system based on extremely low frequency current field is built, and the path loss of 3~10 Hz signal is tested at 200 m and 400 m communication distances. The accuracy of the model is verified by comparing and analyzing the test data and simulation results.

Key words: tunnel rescue; Through-The-Earth (TTE) communications; ground electrode current field; extremely low frequency; path loss model

* 收稿日期:2022-10-08;修回日期:2022-12-14

基金项目:国家重点研发计划(2020YFC1511701);北京市优秀人才培养计划青年拔尖项目(2016000026833ZK08)

通信作者:徐湛 Email:xuzhan@bistu.edu.cn

0 引言

隧道坍塌事故发生后,在隧道洞口和施工掌子面之间,坍塌岩土通常会形成一段厚度在 200 m 以上的全封闭厚实塌方体,导致掌子面施工人员被困,由于对外信息传输链路被塌方体阻断,给实施隧道抢通、及时救援带来极大难度。隧道无线强穿透信息传输技术对于第一时间建立与被困人员的信息传输,打通“生命通道”具有重要意义^[1]。国内外一直持续开展相关研究,迄今为止,现有技术均存在各种制约因素,导致不能在隧道坍塌应急救援场景下可靠应用^[2-3]。

地电极电流场通信是一种以大地为信道的强穿透信息传输技术,具有可靠性高、功耗低等优势,现有研究主要应用于地上至地下,即信号传输方向垂直于地表的信息传输,在山岭隧道通信中不便于现场布设^[4]。本文探索将其应用于水平方向信号传输的可行性,用于隧道坍塌场景下的应急救援通信。

隧道救援透地(Through-The-Earth, TTE)通信信道是包含不同介质(包括黏土、岩石、沙土、钢筋混凝土等)的复杂大地环境^[5],分析信道特性主要包括 3 个方面^[6-8]:一是环境所引起的噪声特性;二是信号输入点的接触阻抗;三是信号在大地信道中的衰减和相移特性(在 TTE 通信中通常收发间距远小于一个波长,因此不考虑相关的相移特性)。

本文拟在 Wite 等人^[9]建立的导电半空间有限源的地下电磁场模型的基础上,结合接触阻抗模型,建立极低频地电极电流场 TTE 通信路径损耗模型;仿真分析信号在不同电极半径、电极入土深度、电极间距、发射信号频率和传输距离下的信号路径损耗,优选工作参数;在此基础上,搭建极低频地电极电流场无线 TTE 通信平台,进行 200 m 和 400 m 极低频 TTE 通信路径损耗测试;最后对实际测试结果的噪声影响进行分析,计算路径损耗并与仿真结果对比分析,验证路径损耗模型的准确性。

1 路径损耗建模

隧道坍塌场景下应急救援通信示意图如图 1 所示。

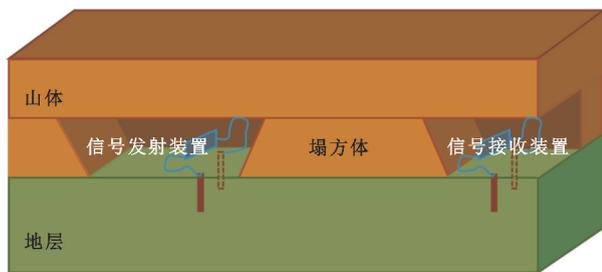


图 1 极低频地电极电流场 TTE 通信示意
Fig. 1 Schematic of TTE communications with extremely low frequency ground electrode current field

传统应用于矿井的地上至地下的电流场 TTE 通信方案中电极插入方向与信号收发电场传播方向基本一致^[10-12],而在水平方向电流场 TTE 通信中电极插入方向与信号收发电场传播方向垂直,如图 2 所示,其电流场传播特性存在较大差异。为此,本文开展应用于水平方向的双电极地电极电流场 TTE 通信路径损耗分析、建模与试验验证。

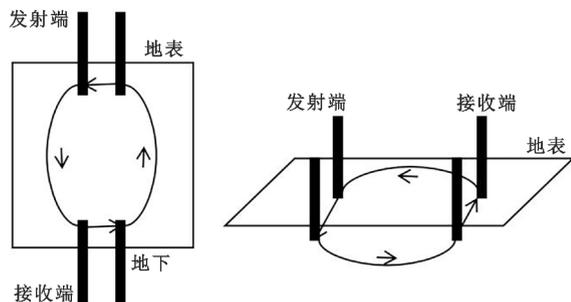


图 2 垂直与水平电流场 TTE 通信示意
Fig. 2 Schematic of vertical and horizontal current field TTE communications

本文采用水平的双电极进行电流场信息传输,将极低频的电信号施加于插入地面的一对电极上,在两电极之间形成交变的电流,由于电极长度远小于通信距离,相当于一贴于地表的具有电流的有限源,从而在地层中形成电流场,通过在接收端的电极对上感应到变化电压实现信息传输^[13-14],模型如图 3 所示。

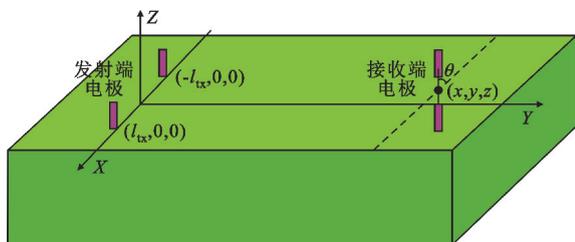


图 3 极低频地电极电流场 TTE 通信模型
Fig. 3 TTE communications model of extremely low frequency ground electrode current field

在研究大地介质中电流场的传播特性时,可以在某一时刻将其看作一种准静电场,由于频率足够低可以忽略位移电流.将大地信道假定为均匀导电媒质,电导率为 σ_1 ,磁导率 $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m。其中,电场强度可以由 $E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$ 计算,电场分量根据文献[9,15]计算, (x, y, z) 点是接收电极间任意一测量点, y 表示通信距离,水平方向电场强度即可表示为

$$E = \frac{V_{tx}}{2\pi\sigma_1 Z_{tx}} \sqrt{\int_{-l_{tx}}^{l_{tx}} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + \frac{\partial^3 N}{\partial y^2 \partial z} \right)^2 + \int_{-l_{tx}}^{l_{tx}} \left(\frac{\partial^3 N}{\partial x \partial y \partial z} \right)^2} \quad (1)$$

式中: $P = R^{-1} e^{-(\gamma R)}$, $R = \sqrt{(x-x')^2 + y^2 + z^2}$; $N = I_0 [(\gamma/2)(R+z)] K_0 [(\gamma/2)(R-z)]$, I_0 和 K_0 是零阶修正贝塞尔函数, $\gamma = \sqrt{2\pi j f \mu \sigma}$, f 是频率; Z_{tx} 为发射端接触阻抗。

接触阻抗 Z_{tx} 计算公式可以表示为^[16-18]

$$Z_{tx} = \frac{1}{4\pi\sigma_2 d} \ln \left[\left(\frac{4d}{a} \right) - 1 - \frac{1}{2l_{tx}} \right] \quad (2)$$

式中: σ_2 是电极间土壤导电率; a 是电极半径; d 电极入土深度; $2l_{tx}$ 是发射端电极间距。

设 V_{tx} 为发射电压, V_{rx} 为接收电压.接收端两电极间的接收电压从 $-l_{rx}$ 积分到 l_{rx} ,公式可以表示为 $V_{rx} = \int_{-l_{rx}}^{l_{rx}} E \cdot d\vec{l}_{rx}$,因为通信距离较远,电场在接收端电极间变化不明显,公式可近似为

$$V_{rx} \approx 2El_{rx} \cos \theta \quad (3)$$

式中: θ 是电场与接收电极间的夹角.路径损耗模型是描述信号经过传播的衰减,理论上可以表示为 $L_p = -20 \lg(|V_{rx}|/|V_{tx}|)$,代入公式(1)、(2)、(3)即可得水平双电极的地电极电流场 TTE 通信路径损耗模型为

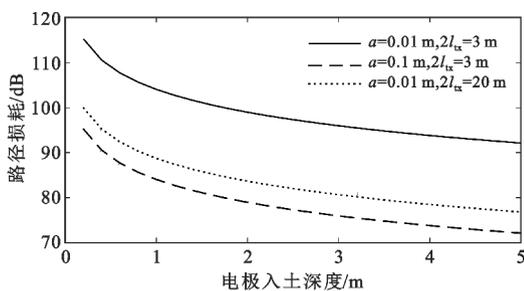
$$L_p(f, \sigma_1, \sigma_2, l_{tx}, l_{rx}, R, \theta, a, d) \approx -20 \lg \left[\frac{4F(f, \sigma_1, l_{tx}, R) l_{rx} \sigma_2 d \cos \theta}{\sigma_1 \ln \left[\left(\frac{4d}{a} \right) - 1 - \frac{1}{2l_{tx}} \right]} \right] \quad (4)$$

$$F(f, \sigma_1, l_{tx}, R) = \sqrt{\int_{-l_{tx}}^{l_{tx}} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + \frac{\partial^3 N}{\partial y^2 \partial z} \right)^2 + \int_{-l_{tx}}^{l_{tx}} \left(\frac{\partial^3 N}{\partial x \partial y \partial z} \right)^2} \quad (5)$$

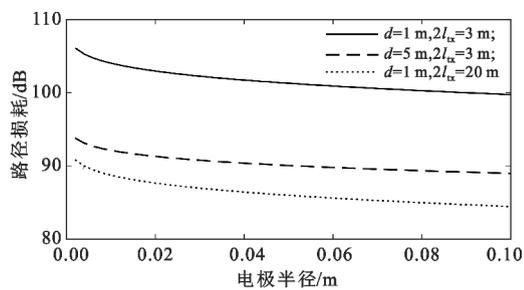
由公式(4)和(5)可以看出,信号在水平方向电流场传输过程中的路径损耗与发射信号频率、大地信道电导率、电极间土壤电导率、传输距离、收发端电极间距、电场方向与接收电极的夹角、电极半径和电极入土深度有关。

2 路径损耗仿真

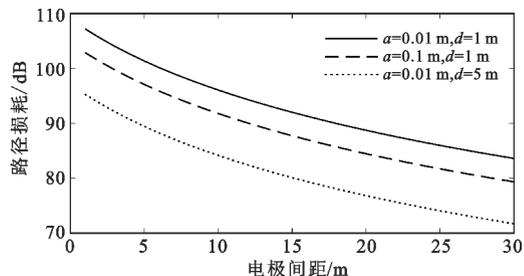
根据公式(4),仿真发射信号频率为 8 Hz,大地信道电导率为 0.01 S/m(沙质黏土)时^[19],路径损耗与电极入土深度、电极半径和电极间距的关系,结果如图 4 所示.从图 4(a)可以看出,路径损耗随电极入土深度的增加而减小,在电极入土深度为 1 m 前变化较为明显,1 m 后变化趋势减缓.从图 4(b)可以看出,路径损耗随电极半径的增加而减小,在电极半径为 0.01 m 前变化较为明显,0.01 m 后趋于平缓.由仿真结果结合实际可操作性优选电极半径为 0.01 m,电极长 1.2 m,入土深度 1 m.从图 4(c)路径损耗与电极间距的关系可以看出,在电极间距 1~20 m 变化范围内,路径损耗随电极间距增大而减小,在条件允许时,为增大接收电压幅值可以增大电极间距。



(a) 路径损耗与电极入土深度的关系



(b) 路径损耗与电极半径的关系



(c) 路径损耗与电极间距的关系

图 4 路径损耗分析
Fig. 4 Path loss analysis

假设电极间土壤电导率为 0.01 S/m , 电极间距 3 m , 偏向角为 45° , 根据上述电极优选参数, 按照公式(4)仿真通信距离为 200 m 时, 路径损耗与发射信号频率的关系, 结果如图 5(a) 所示。从图 5(a) 中可以看出, 发射信号频率低于 20 Hz 时, 路径损耗随频率的增加而减小, 高于 20 Hz 时路径损耗随频率的增加而增大, 信号在极低频段路径损耗在 104 dB 上下微小波动。通信距离为 400 m 时, 路径损耗与发射信号频率的关系如图 5(b) 所示, 可以看出路径损耗在 8 Hz 左右达到最小值, 信号在极低频段损耗在 126 dB 上下微小波动。

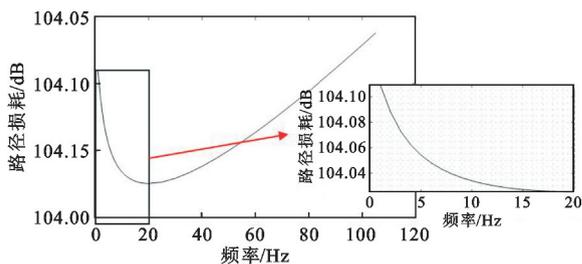
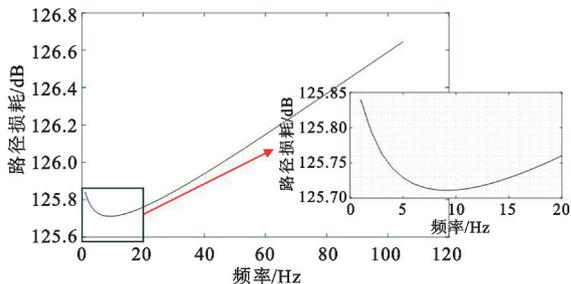
(a) 通信距离 200 m (b) 通信距离 400 m

图 5 路径损耗与发射信号频率的关系

Fig. 5 Relationship between path loss and transmitted signal frequency

由图 5(a) 和 (b) 对比可知, 通信距离越远, 路径损耗越大, 最佳发射信号频率越小。

3 实验数据采集

为了验证模型的准确性, 本文设计并搭建了极低频地电极电流场无线 TTE 通信系统, 包括电流场信号发射装置、电流场信号接收装置、导线和 4 根长 1.2 m 、半径 0.01 m 的电极。按图 6 所示布置实验, 电极间距 3 m , 入土深度 1 m 。发射信号包络恒定, 频率从 $3 \sim 10 \text{ Hz}$ 逐频增加, 各单一频率信号时

长 1 s , 信号总长 8 s 。

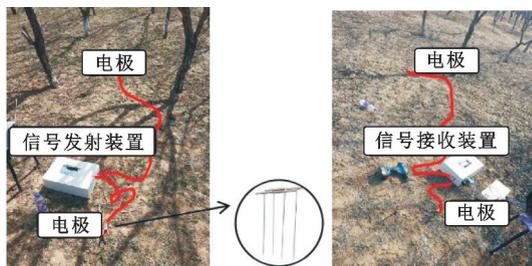


图 6 极低频地电极电流场 TTE 通信测试

Fig. 6 Testing of TTE communications of extremely low frequency ground electrode current field

分别进行了通信距离为 200 m 和 400 m 的路径损耗测试, 由于 400 m 时接收信号很微弱, 为提高接收电压幅值, 在电极处加水 (发射端电极安插处注入 550 mL 纯净水), 以减小接触阻抗, 测试结果与不加水时作对比。

4 试验结果与分析

通信距离 200 m 、发送电压 100 V , 通信距离 400 m 、发送电压 180 V , 以及通信距离 400 m 、电极处加水、发送电压 180 V 时接收信号时域和频域信息如图 7(a) 所示。从图中可以看出, 信号的主要信息频段在 $3 \sim 10 \text{ Hz}$ 之间, 信号受干扰影响明显, 干扰主要包括直流信号分量和 50 Hz 工频干扰, 及一些 100 Hz 和 150 Hz 的谐波干扰。

设计加窗线性相位 FIR1 带通滤波器, 200 m 接收信号通带频率为 1 Hz , 阻带频率为 15 Hz , 400 m 接收信号通带频率为 2 Hz , 阻带频率为 12 Hz , 滤波器的幅度和相位响应如图 7(b) 所示。接收信号经滤波器对干扰进行滤除后信号时域和频域信息如图 7(c) 所示, 可以看出在实际测量结果中, 发射信号频率从 $3 \sim 10 \text{ Hz}$ 变化时, 接收信号电压幅值变化不明显。

通信距离为 200 m 时, 不同发射信号频率下路径损耗仿真和实测数据对比如图 8(a) 所示, 可以看出仿真与实测路径损耗均在 104 dB 附近, 信号频率在 $3 \sim 10 \text{ Hz}$ 变化时路径损耗呈下降趋势, 且随着频率升高变化趋缓。通信距离为 400 m 时, 仿真与实测数据如图 8(b) 所示, 路径损耗均在 126 dB 附近, 发射信号频率在 $3 \sim 8 \text{ Hz}$ 时呈缓慢下降趋势, 在 $8 \sim 10 \text{ Hz}$ 时缓慢上升。实测与仿真模型基本一致。

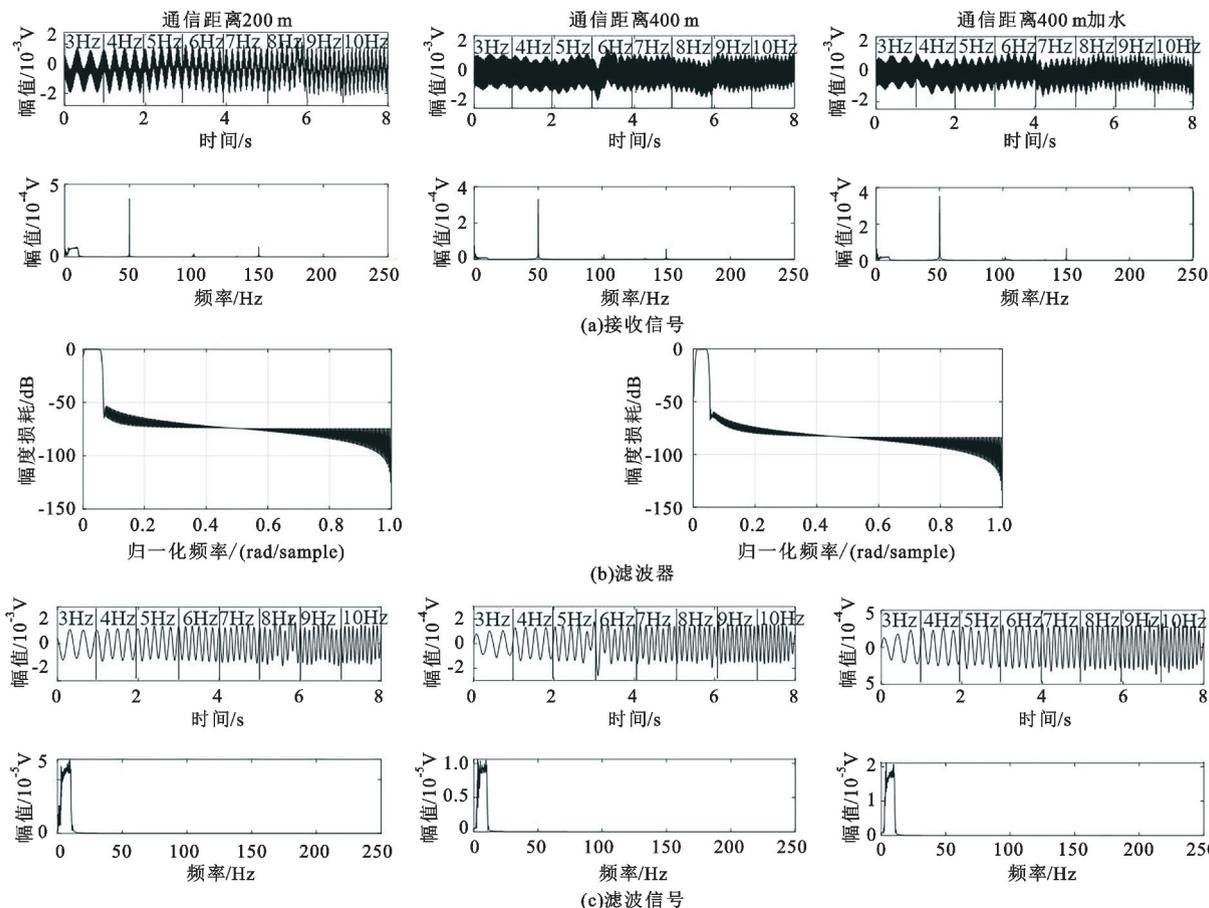


图 7 接收信号滤波处理结果

Fig. 7 Filtering processing result of the received signals

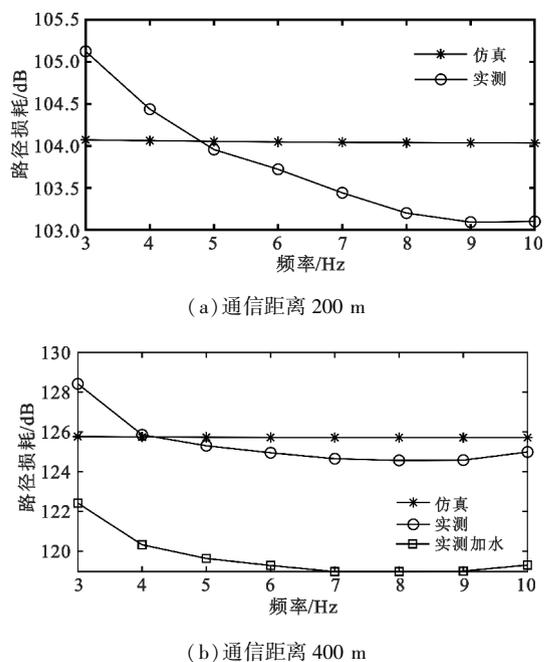


图 8 仿真与实测下路径损耗与频率的关系

Fig. 8 Relationship between path loss and frequency under simulation and measurement

中,通信距离对信号的路径损耗有显著影响,通信距离越远,信号衰减越大,通信距离为 400 m 时较 200 m 损耗增加了近 20 dB;在电极处加水可以明显增大电极间土壤电导率,降低接触阻抗,增大接收电压幅值,实测路径损耗较不加水时减小约 6 dB。

5 结论

针对隧道坍塌场景下的无线强穿透通信需求,本文将地电极电流场 TTE 通信方式应用于水平方向的应急通信,建立了双电极的水平地电极电流场 TTE 通信路径损耗模型。由于接触阻抗与路径损耗紧密相关,提供了包括电极半径、电极入土深度和电极间距的路径损耗表达式,给出了应用于水平方向 TTE 通信的最佳电极半径为 0.01 m,电极入土深度为 1 m。搭建了极低频电流场 TTE 通信系统,测试了发射信号频率在极低频 3~10 Hz 时的路径损耗。结果分析表明,实测数据路径损耗与发射信号频率的关系与模型仿真结果基本一致,证明了模型的准确性。

由图 8 可知,在水平地电极电流场 TTE 通信

参考文献:

- [1] YARKAN S, GUZELGOZ S, ARSLAN H, et al. Underground mine communications: a survey [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2009, 11(3): 125-142.
- [2] ZHANG Y, YAN X, LI C. Research of the emergency communication system in coal mine based on ZigBee technology [C] // Proceedings of 2015 Seventh International Conference on Advanced Communication and Networking. Wuyi: IEEE, 2015: 60-63.
- [3] ZHAO H, YANG W. An emergency rescue communication system and environmental monitoring subsystem for underground coal mine based on wireless mesh network [BE/OL]. (2018-09-10) [2022-09-25]. <https://doi.org/10.1177/1550147718805935>.
- [4] ZHOU C, DAMIANO N. Electromagnetic environments and wireless channels for Through-The-Earth (TTE) communications in an underground coal mine: modeling and measurements [J]. Progress In Electromagnetics Research M, 2021, 103: 91-101.
- [5] 刘宝衡,付天晖,侯文达. 无线磁感应透地通信传输距离分析 [J]. 电讯技术, 2022, 62(3): 361-366.
- [6] YAN L, ZHOU C, REYS M, et al. Mathematical modeling and measurement of electric fields of electrode-based Through-The-Earth (TTE) communication [J]. Radio Science, 2017, 52(6): 731-742.
- [7] 贾雨龙. 基于 TLM 法的应急透地无线信道的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [8] JIANG H, MUKHERJEE M, ZHOU J, et al. Channel modeling and characteristics for 6G wireless communications [J]. IEEE Network, 2020, 35(1): 296-303.
- [9] WAIT J R. The electromagnetic fields of a horizontal dipole in the presence of a conducting half-space [J]. Canadian Journal of Physics, 1961, 39(7): 1017-1028.
- [10] 孟军衔. 电流场矿井透地扩频通信系统设计与实现 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [11] TALAAT M, FARAHAT M A, ESSA M A, et al. Simulation of the electric field and the GPR resulting from vertical-driven rods earthing system in a multi-layers earth structure [J]. Measurement, 2019, 132: 387-401.
- [12] 耿伟智,王楠,阎毓杰. 电流场矿井透地通信系统发射机的设计与实现 [J]. 信息通信, 2016(11): 213-215.
- [13] SU Z, CHEN J, XU Z, et al. A TTE-LAN communication scheme for tunnel rescuing [J]. Journal of Physics, 2019, 1213(5): 1-6.
- [14] ZHANG G, XU Z, CHEN J, et al. OFDM signal design based on electrode-based Through-The-Earth communication [C] // Proceedings of 2021 International Conference on Ubiquitous Computing and Communications. London: IEEE, 2021: 40-45.
- [15] HILL D A, WAIT J R. Subsurface electromagnetic fields of a grounded cable of finite length [J]. Canadian Journal of Physics, 1973, 51(14): 1534-1540.
- [16] BATALLER V, MUNOZ A, GAUDO P M, et al. Earth impedance model for Through-The-Earth communication applications with electrodes [J]. Radio Science, 2010, 45(6): 1-18.
- [17] BATALLER V, MUNOZ A, GAUDO P M, et al. Electrode impedance measurement in Through-The-Earth communication applications [J]. IET Microwaves, Antennas and Propagation, 2012, 6(7): 807-812.
- [18] MA H, LIU E, WANG R, et al. Antenna optimization for decode-and-forward relay in magnetic induction communications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 69(3): 3449-3453.
- [19] DAMIANO N W, YAN L, WHISNER B, et al. Simulation and measurement of Through-The-Earth, extremely low-frequency signals using copper-clad steel ground rods [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(5): 5088-5095.

作者简介:

徐湛 男, 1982 年生于北京, 2010 年于北京理工大学获博士学位, 现为教授, 主要研究方向为无线通信、信号处理。

温晓雯 女, 1996 年生于山西忻州, 2018 年于太原理工大学获学士学位, 现为硕士研究生, 主要研究方向为透地通信。

张淦 男, 1997 年生于河南南阳, 2022 年于北京信息科技大学获硕士学位, 现为博士研究生, 主要研究方向为透地通信、雷达信号处理。