

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106959

两种磁感应通信信道建模与特性分析*

刘宝衡 付天晖 侯文达

(中国人民解放军海军工程大学 武汉 430033)

摘要:为了解决地下环境中无线磁感应通信系统存在路径损耗大,无法实现较远距离通信的问题,本文构建了基于波导技术与协同技术的磁感应信道模型。通过波导技术,向收发线圈之间引入无源中继线圈,经过谐振线圈的磁耦合完成信号传递;通过协同技术,传输的磁感应波由多条不同路径到达接收端,从而完成信息的传输。对路径损耗、误码率等特性仿真分析,结果表明:路径损耗小于100 dB时,普通磁感应系统最大传输距离约为20 m,而磁感应协同系统与波导系统最大距离分别延长至45与150 m以上;在传输距离较近时,磁感应波导系统的路径损耗大于协同系统,可通过减小中继线圈的间距和电阻进一步降低其路径损耗;磁感应协同系统的路径损耗受线圈的位置、间距和数量影响较小,从而降低了部署的难度。因此,构建的两种通信模型都能有效降低信道路径损耗,增大通信距离,波导技术效果更明显。

关键词:磁感应通信;信道模型;磁感应波导技术;磁感应协同技术;地下通信

中图分类号: TN929.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Modeling and characteristics analysis of two magnetic induction communication channels

Liu Baoheng Fu Tianhui Hou Wenda

(Naval University of Engineering of PLA, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to solve the problem that the wireless magnetic induction communication system in underground environment has large path loss and can not achieve long-distance communication, this paper constructs the magnetic induction channel models based on waveguide technology and collaborative technology. Through waveguide technology, passive relay coils are introduced between the transceiver coils, and the transmission of signals is completed through the magnetic coupling of a series of resonant coils; through cooperative technology, the transmitted magnetic induction wave reaches the receiver by multiple different paths to complete the transmission of information. Through the simulation analysis of path loss, BER and other characteristics, the results show that: when the path loss is less than 100 dB, the maximum transmission distance of the ordinary magnetic induction system is about 20 m, while the maximum distance of the magnetic induction collaborative system and the waveguide system is extended to 45 and 150 m respectively; the path loss of the magnetic induction waveguide system is greater than that of the cooperative system when the transmission distance is close, and its path loss can be further reduced by reducing the spacing and resistance of the relay coils. The path loss of magnetic induction cooperative system is less affected by the location, spacing and number of coils, thus reducing the difficulty of deployment. So, both communication models can effectively reduce the path loss of the channel and increase the communication distance, and the waveguide technology is more effective.

Keywords: magnetic induction communication; channel model; magnetic induction waveguide technology; magnetic induction collaboration technology; underground communications

0 引言

目前对地下通信的研究与现有的地下通信系统都主要

以电磁波技术为主,但传统的电磁波存在许多不足^[1-3]。磁感应通信通过接收线圈与发射线圈之间准静态磁场的耦合实现信息的传递^[4-6],由于磁导率在复杂地质介质中几乎相

收稿日期:2021-06-16

* 基金项目:国家自然科学基金(41631072)项目资助

同,收发天线采用辐射电阻比电偶极子小得多的小尺寸线圈,因此其解决了传统电磁波通信中传输信道不稳定、天线尺寸大、多径效应等问题^[7-9],受到了国内外越来越多的关注和研究。

与传统的电磁波技术相比,磁感应系统具有相对较长的传输距离,但是其路径损耗依然较大,无法实现较远距离的通信需求^[10]。为了有效地减小磁信号本身衰落、增大通信距离,国内外学者们提出了很多想法,做了大量研究工作。文献[11]提出了超材料增强型磁感应通信方式,以此增强磁感应收发器周围的磁场,但球形超材料是理想的均匀性和各向同性的,设计制造非常困难且成本昂贵。文献[12]研究了基于多输入单输出的磁感应通信系统,提高了通信系统的传输距离,但多线圈之间的串扰问题没有解决且线圈的布局摆放精度要求很高;文献[13]为增加发射机磁场强度,采用铁氧体磁场发生器来进行远距离透地通信,但只有在忽略退磁效应和铁氧体磁感应强度未饱和时才能得出,这与实际情况有较大差距。可以看出,磁感应通信仍处于初步发展阶段,其面临的最大问题是传输损耗高,通信距离短。为此,本文构建了基于波导技术与基于协同技术的磁感应信道模型,并基于两种信道模型分析了路径损耗、误码率等信道特性,解决了传统磁感应通信中通信距离较短的问题。研究结果为实现更长距离的透地通信提供了指导性建议,为更好地研究地下磁感应通信网络和传输特性提供了理论依据。

1 技术原理

1.1 磁感应波导技术分析

磁感应波导技术是在收发线圈之间引入一定数量的无源中继线圈,当向发射线圈中通入正弦电流时,通过一系列谐振线圈的磁耦合,多个中继线圈中依次产生感应电流,逐级将信息传播下去,从而完成信号和能量的传递^[14],能够很好的解决普通磁感应通信中高路径损耗问题,并且中继线圈不消耗任何能量,成本低,易于部署和维护^[15]。

图 1 为典型的磁感应波导结构图。发射线圈与接收线圈之间等间隔部署 $(n-2)$ 个中继线圈,线圈总数为 n 且所有线圈采用相同的尺寸、匝数等设计参数,相邻线圈距离为 r ,收发线圈之间距离为 $d=(n-1)r$, a 为线圈半径。在 n 个线圈中都加入一个匹配电容 C ,通过设计适当的电容值,可以形成谐振线圈,整个磁感应波导系统处于谐振状态,有效的传输信号^[16]。任何一对线圈之间都存在互感,互感的值取决于线圈之间的距离,与线圈半径相比,线圈之间距离足够大,因此仅考虑相邻线圈之间的相互感应。

1.2 磁感应协同技术分析

图 2 所示为磁感应协同结构示意图。收发线圈之间部署 $(n-2)$ 个中继线圈,所有中继线圈放置在同一垂直轴上,线圈总数为 n 且所有线圈设计参数相同。每个中继线圈与收发线圈组成一条单独传输路径,传输的磁感应波由

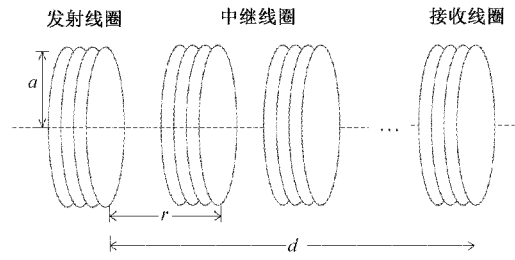


图 1 磁感应波导结构示意图

多条不同路径到达接收端,所有协同中继节点向接收端传输相同的数据,完成信息的传输。中继线圈等间隔分布,相邻之间距离为 r ,发射线圈、接收线圈与中继线圈所在垂直轴的距离分别为 x_1, x_2 ,传输距离为 $d = x_1 + x_2$ 。

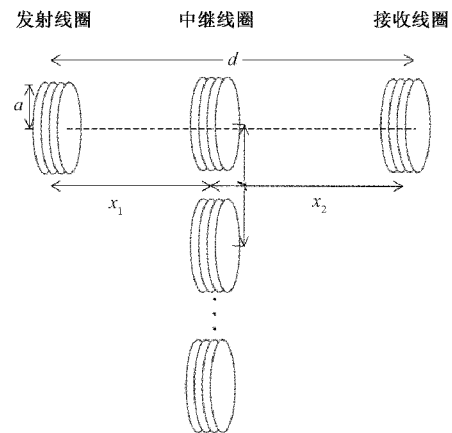


图 2 磁感应协同结构示意图

2 信道模型

2.1 磁感应波导通信信道建模

磁感应波导系统建模为多级变压器,收发线圈与所有中继线圈均采用相同的匝数、阻抗、匹配电容、自感等设计参数。 M 是相邻线圈的互感, L 为线圈的自感, R 为线圈的阻抗, C 为匹配电容, U_s 是发射机电压, N 是线圈匝数, n 为线圈总数, μ 为真空磁导率。图 3 所示为磁感应波导通信系统的等效电路图。

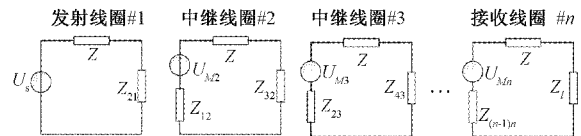


图 3 磁感应波导等效电路

当线圈处于谐振状态时,线圈阻抗仅由线圈电阻组成,即 $Z=R$ 。因此调节匹配电容,使 $j\omega L + 1/j\omega C = 0$,整个磁感应波导系统处于谐振状态,此时接收线圈功率 P_r 为^[16]:

$$P_r = \frac{1}{4(Z_{(n-1)n} + R)} \cdot \frac{U_s^2}{\zeta^2 \left(\frac{R}{\omega M}, n-1 \right)} \quad (1)$$

$$\zeta^2\left(\frac{R}{\omega M}, n-1\right) = b_{n-1}\left(\frac{R}{\omega M}\right)^{n-1} + b_{n-2}\left(\frac{R}{\omega M}\right)^{n-2} + \dots + b_2\left(\frac{R}{\omega M}\right)^2 + b_1\left(\frac{R}{\omega M}\right) + b_0 \quad (2)$$

$$Z_{(i-1)i} = \frac{\omega^2 M^2}{Z + Z_{(i-2)(i-1)}} \quad (i = 3, 4, \dots, n \text{ 且 } Z_{12} = \frac{\omega^2 M^2}{Z}) \quad (3)$$

其中, $Z_{(i-1)i}$ 为第 $(i-1)$ 个线圈在第 i 个线圈上产生的反射阻抗。 $\{b_i, i = 0, 1, 2, 3, \dots, n-1\}$ 为多项式系数。

2.2 磁感应协同通信信道建模

图 4 所示为磁感应协同通信系统的等效电路图, 每个中继线圈与收发线圈构成一组等效电路, 共有 $(n-2)$ 组电路, 分别编号为 $0, 1, \dots, (n-3)$ 。在第 i 组电路中, 由式(1)可知, 接收线圈获得的功率 $P_r^{(i)}$ 为:

$$P_r^{(i)} = \operatorname{Re}\left\{\frac{Z_i \cdot U_3^{(i)2}}{(Z_i + R + Z_{23}^{(i)})^2}\right\} \quad (4)$$

$$U_3^{(i)} = \frac{\omega^2 M_1^{(i)} M_2^{(i)} U_s}{R^2 + (\omega M_1^{(i)})^2}, Z_{23}^{(i)} = \frac{\omega^2 M_2^2 R}{\omega^2 M_1^2 + R^2} \quad (5)$$

$$M_1^{(i)} = \frac{\mu \pi N^2 a^4}{2(x_1^2 + (i \cdot r)^2)^{3/2}}, M_2^{(i)} = \frac{\mu \pi N^2 a^4}{2(x_2^2 + (i \cdot r)^2)^{3/2}} \quad (6)$$

其中, Z_i 为接收线圈负载阻抗; R 为线圈的阻抗; $U_3^{(i)}$ 是第 i 组电路中, 接收线圈产生的电压; $Z_{23}^{(i)}$ 是第 i 组电路中, 中继线圈对接收线圈产生的反射阻抗; $M_1^{(i)}$ 是第 i 组电路中, 发射线圈与中继线圈之间的互感; $M_2^{(i)}$ 是接收线圈与中继线圈之间的互感; μ 为真空磁导率。

则接收线圈获得的总功率 P_r 为:

$$P_r = \sum_{i=0}^{(n-3)} \frac{Z_i \cdot U_3^{(i)2}}{(Z_i + R + Z_{23}^{(i)})^2} \quad (7)$$

当线圈处于谐振状态时, $Z_i = \overline{Z_{23}^{(i)}} + R$, 此时式(7)可写为:

$$P_r = \sum_{i=0}^{(n-3)} \frac{\omega^4 M_1^{(i)2} M_2^{(i)2} U_s^2}{4(R^2 + \omega^2 M_1^{(i)2})^2 \left(1 + \frac{\omega^2 M_2^{(i)2}}{R^2 + \omega^2 M_1^{(i)2}}\right)} \quad (8)$$

3 信道仿真分析

本文采用 MATLAB 对两种通信系统的信道特性进行仿真与分析。假设所有线圈参数一致, 半径 a 设为 0.15 m , 线圈匝数 N 为 5 , 线圈的单位长度阻抗 R_0 为 $0.01 \Omega/\text{m}$, 频率 f 为 10 MHz 。

3.1 信道路径损耗仿真

磁感应通信系统的发射功率由接收端消耗的感应功率和线圈电阻消耗功率组成, 由于磁感应通信是通过近场耦合实现的, 且线圈电阻较小, 辐射功率很小, 因此有限的传输能量不会浪费在周围空间的辐射上, 大部分功率被传输到接收端^[17]。系统的路径损耗可表示为:

$$L = -10 \lg\left(\frac{P_r}{P_t}\right) \quad (9)$$

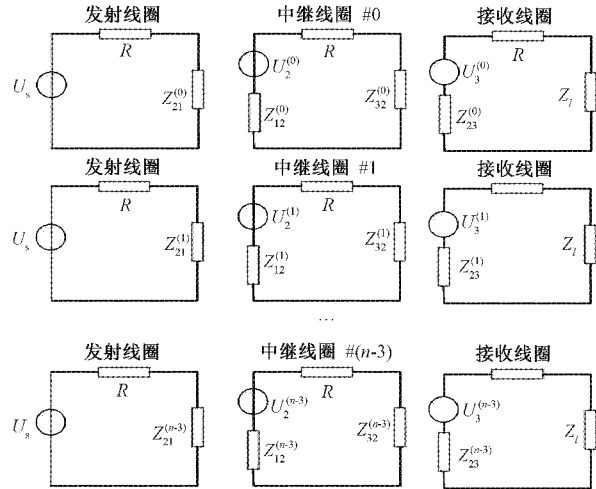


图 4 磁感应协同等效电路

将式(1)与(8)代入式(9)中, 结果如图 5 所示。

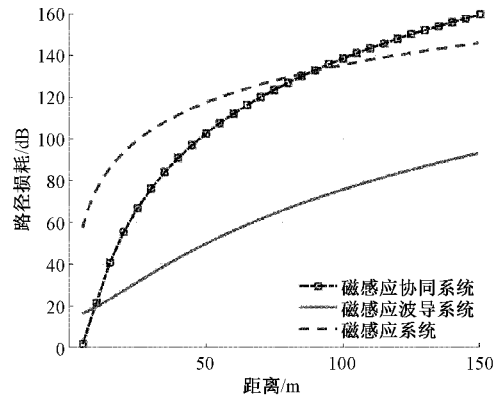
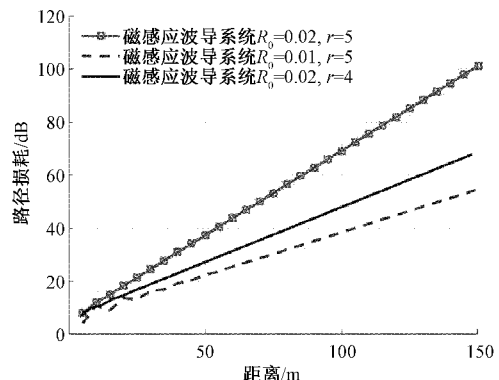


图 5 路径损耗对比图

由图 5 可知, 当路径损耗小于 100 dB 时, 普通磁感应系统最大传输距离约为 20 m , 而磁感应协同系统与波导系统最大距离分别延长至 45 与 150 m 以上。可见两种通信模型都有效降低了信道的路径损耗, 增大通信距离, 波导技术效果更明显, 但在距离较近时 ($< 10 \text{ m}$), 磁感应波导系统的路径损耗要大于协同系统。

改变两个系统的仿真参数, 可以得到不同参数时的路径损耗图, 如图 6.7 所示。



(a) 路径损耗与线圈间距、电阻关系

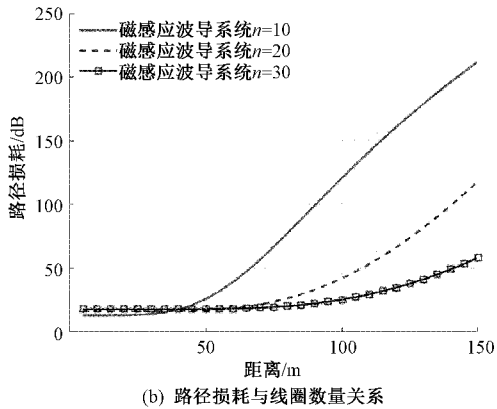


图6 不同线圈间距、电阻与数量时的磁感应波导系统路径损耗

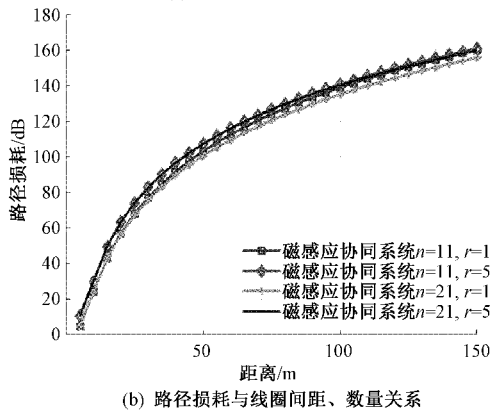
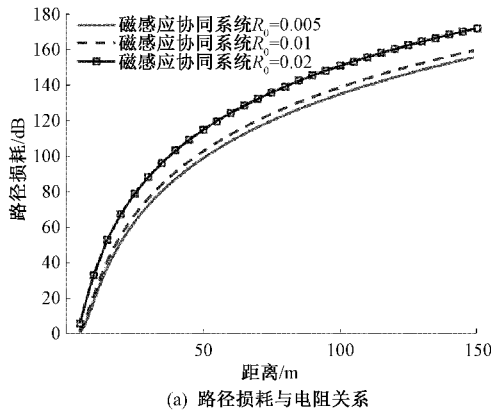


图7 不同线圈电阻、间距与数量时的磁感应协同系统路径损耗

由图6可知,通过减小中继线圈的间距和电阻,可以进一步减小路径损耗。在传输距离较近时($<40\text{m}$),增加中继线圈数量,效果并不明显,会产生更大的路径损耗,传输距离较大时,增加中继线圈数量对减小路径损耗有很好的作用。由图7可知,磁感应协同系统的路径损耗受线圈的间距和数量影响很小,且可通过减小中继线圈的电阻,降低其路径损耗。

上述路径损耗是在理想部署情况下,即所有中继线圈

均匀分布,这也是已有研究的主要方向。但在实际应用中,由于岩石或土壤中管道的影响以及地面压力、土壤运动导致线圈位置变化,很难达到理想部署状态^[18],因此,有必要分析非理想部署对路径损耗的影响。

假设中继线圈*i*的位置是一个均值 i^*r ,标准差为 σ 的高斯随机变量,标准差分别为中继线圈距离的5%、10%,其他设计参数保持不变,得到两种系统非理想部署时的路径损耗曲线,如图8所示。

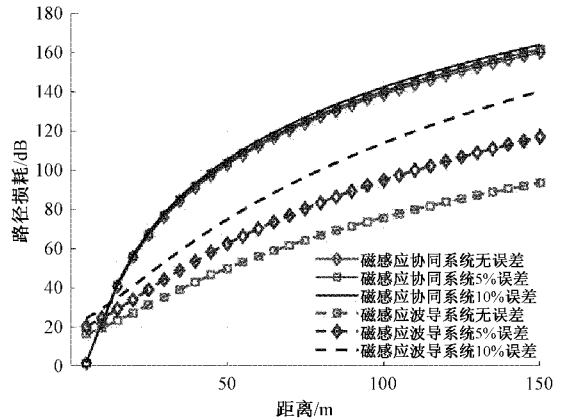


图8 不同偏离时两种系统的路径损耗

由图8可知,对于磁感应波导系统,随着部署偏差的增大,路径损耗明显增加,系统可靠性也会下降;而对于磁感应协同系统,部署偏差对其影响很小,表明磁感应协同系统的特性受线圈的位置影响较小,降低了部署的难度。

3.2 信道误码率仿真

通信系统误码率主要取决于路径损耗、噪声和系统调制方式3个因素^[19]。假设高噪声地下环境,噪声功率为83 dBm,低噪声时,噪声功率为103 dBm,发射功率设为10 dBm,调制方式均采用2 PSK。图9为两个噪声级下,3种系统的信道误码率与通信距离的关系曲线。可以发现,磁感应波导系统与磁感应协同系统都降低了误码率,增大了通信距离,与普通磁感应系统相比,磁感应协同系统的通信距离增加了1倍,在低噪声情况下,波导系统的传输距离

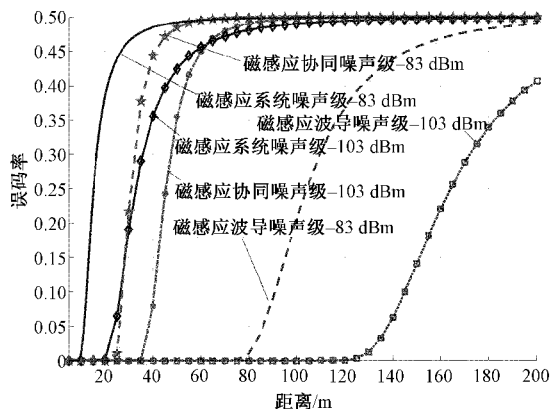


图9 不同噪声级下3种系统的信道误码率

是普通磁感应系统的10倍,即使在高噪声情况下,波导系统的传输范围也提高了5倍以上。

4 结 论

本文构建了基于波导技术的磁感应通道模型和基于协同技术的磁感应通道模型,通过对路径损耗、误码率等特性进行仿真分析,得出以下结论。

1)建立的两种通信模型都有效降低了信道的路径损耗,增大通信距离,波导技术效果更明显,在距离较近时,磁感应波导系统的路径损耗要大于协同系统。

2)磁感应波导通信系统中,可通过减小中继线圈的间距和电阻,进一步减小路径损耗。在传输距离较近时,增加中继线圈数量,效果并不明显,会产生更大的路径损耗,且其特性与稳定性受线圈位置部署影响较大。

3)磁感应协同通信系统受线圈的间距、数量以及部署情况影响很小,且可通过减小中继线圈的电阻,降低其路径损耗。

研究结果为更好地研究地下磁感应通信网络和传输特性提供了理论依据,为实现更长距离的透地通信提供了指导性建议,未来还将考虑到土壤介质的磁导率、电导率和介电常数等电磁参数,并且需要通过实际实验对仿真结果进一步验证。

参考文献

- [1] 施文娟,孙彦景,李松. 挑战环境下无线磁感应传感网理论与关键技[J]. 工矿自动化, 2016, 42(6): 20-25.
- [2] 孙彦景,徐胜,施文娟,等. 无线地下磁感应通信系统研究与实现[J]. 传感技术学报, 2017, 30(6): 904-908.
- [3] 刘洲洲,王晓柱. 基于WUSN的磁感应技术传输特性研究[J]. 微处理机, 2017, 38(1): 63-66.
- [4] 刘明阳. 磁感应通信在地下物联网中的应用[J]. 物联网技术, 2019, 11(3): 46-48.
- [5] 刘珊,安志勇,刘莉,等. 基于电磁感应原理无线传感器联合触发技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(3): 487-492.
- [6] 孙彦景,吴天琦,施文娟,等. 无线透地通信理论与关键技术研究[J]. 工矿自动化, 2017, 3(9): 46-53.
- [7] 施文娟,王亮,孙彦景,等. 地下磁感应通信天线模型及信号传播特性研究[J]. 工矿自动化, 2018, 44(7): 45-53.
- [8] 王婷婷,徐钊,张晓光. 协同通信在煤矿井下的应用研究[J]. 工矿自动化, 2015, 41(2): 32-35.
- [9] 柯丽,刘晶,杜强. 基于磁感应的水质电导率检测系统研究[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(2): 70-76.
- [10] 王鹏,陶晋宜,贾雨龙. 基于FEKO无线透地通信天线电磁特性的探究[J]. 微波学报, 2016, 32(1): 70-74.
- [11] SUN Z, AKYILDIZ I F, KISSELEFF S, et al. Increasing the capacity of magnetic induction communications in RF-challenged environments [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(9): 3943-3952.
- [12] AGBINYA J I, MASHPOUR M. Power equations and capacity performance of magnetic induction communication systems [J]. Wireless Personal Communications, 2012, 64(4): 831-845.
- [13] LIU T, WEI Y, SONG G, et al. Fibre optic sensors for coal mine hazard detection[J]. Measurement, 2018(124): 211-223.
- [14] 马静. 地表下近场磁感应通信传播特性研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2016.
- [15] 刘亚军,刘锋,杨德斌,等. 地下远距离通信系统传播信号监测仿真[J]. 计算机仿真, 2016, 33(10): 148-152.
- [16] YAN L, SUNDERMAN C, WHISNER B, et al. Antenna arrangement investigation for through-the-earth(TTE) communications in coal mines[C]. Industry Application Society Meeting, IEEE, 2015: 1-6.
- [17] ZHANG S Q, YIN T, LIU Z P. Research on the weak acoustic signal features based on magneto-acoustic effect[J]. Instrumentation, 2016, 3(4): 78-90.
- [18] 何瑛,陈北莉,刘舟洲,等. 基于无线地下传感网的信道路径带宽系统设计[J]. 电子器件, 2020, 43(2): 462-465.
- [19] 李中,李开放,刘洲洲. 磁感应地下通信网络系统优化方案研究[J]. 信息技术, 2018, 23(8): 102-105.

作者简介

刘宝衡,硕士研究生,主要研究方向为无线通信、透地通信等。

E-mail:1094480943@qq.com

付天晖,博士,副教授,主要研究方向为无线通信等。

E-mail:1901571166@qq.com

侯文达,硕士研究生,主要研究方向为无线通信等。

E-mail:729980034@qq.com