

文章编号:1671-251X(2019)06-0010-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17412

面向应急救援的多输入单输出磁感应透地通信



扫码移动阅读

王艳芬¹, 王亮¹, 孙彦景^{1,2}, 张亮¹, 徐华³, 潘东跃¹

(1. 中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 西安科技大学 通信与信息工程学院, 陕西 西安 710054;

3. 盐城师范学院 新能源与电子工程学院, 江苏 盐城 224007)

摘要:为提高磁感应透地通信系统的传输性能,扩大磁感应透地通信系统的传输距离,研究了多输入单输出(MISO)磁感应透地通信系统:建立了 MISO 模型,并根据基尔霍夫定律建立 KCL 方程,获得了 MISO 模型的收发功率,分析了 MISO 磁感应透地通信系统的路径损耗;研究了 MISO 模型磁感应强度分布特性,得出了 MISO 磁感应透地通信系统的信号传输特点。研究表明:当发射线圈具有相同电流时,MISO 模型较单输入单输出(SISO)模型的路径损耗明显降低,发射线圈越多,则路径损耗越小;当发射功率相同时,接收功率近似与发射线圈个数呈正比,接收端磁感应强度随发射线圈个数的增加而增大;MISO 模型能够有效提高磁感应透地通信系统的传输距离,当各发射线圈通有相同电流时,MISO_(1,2)模型的传输距离约为 SISO 模型的 1.11 倍,MISO_(2,2)模型的传输距离约为 SISO 模型的 1.26 倍。

关键词:矿井通信;应急救援;透地通信;磁感应透地通信;多输入单输出模型;磁感应强度;路径损耗;传输距离

中图分类号:TD655 文献标志码:A

Multiple input single output magnetic induction through-the-earth
communication for emergency rescue

WANG Yanfen¹, WANG Liang¹, SUN Yanjing^{1,2}, ZHANG Liang¹, XU Hua³, PAN Dongyue¹

(1. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. School of New Energy and Electrical Engineering, Yancheng Teachers University, Yancheng 224007, China)

Abstract:In order to improve transmission performance and increase transmission distance of magnetic induction through-the-earth communication system, multiple input single output (MISO) magnetic induction through-the-earth communication system was studied. A MISO model was established and KCL equations were built according to Kirchhoff law, so as to get transmitting and receiving power. Path loss of MISO magnetic induction through-the-earth communication system was analyzed. Magnetic induction density of MISO model was researched and signal transmission characteristics of MISO magnetic induction through-the-earth communication system were obtained. The results show that: When transmitting coils have the same current, path loss of MISO model is significantly lower than that of single input single output (SISO) model. The more transmitting coils there are, the smaller the path loss will be. When

收稿日期:2019-03-14;修回日期:2019-05-05;责任编辑:李明。

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51804304);国家自然科学基金资助项目(61771417);国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801403);江苏省重点研发计划资助项目(BE2015040);徐州市科技项目(KC18105,KC18068)。

作者简介:王艳芬(1962—),女,江苏徐州人,教授,博士,主要从事超宽带无线通信、信道建模和信号处理等方面的工作,E-mail:lszwyf@163.com。

引用格式:王艳芬,王亮,孙彦景,等.面向应急救援的多输入单输出磁感应透地通信[J].工矿自动化,2019,45(6):10-15.

WANG Yanfen, WANG Liang, SUN Yanjing, et al. Multiple input single output magnetic induction through-the-earth communication for emergency rescue[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(6): 10-15.

transmitting power is the same, receiving power is proportional to the number of transmitting coils, and magnetic induction density at receiving end increases with the number of transmitting coils increases. The MISO model can effectively increase transmission distance of magnetic induction through-the-earth communication system. When all transmitting coils have the same current, transmission distance of $MISO_{(1,2)}$ model is about 1.11 times than that of the SISO model, and the transmission distance of $MISO_{(2,2)}$ model is about 1.26 times than that of the SISO model.

Key words: mine communication; emergency rescue; through-the-earth communication; magnetic induction through-the-earth communication; MISO model; magnetic induction density; path loss; transmission distance

0 引言

煤炭行业在中国经济建设中占有重要地位,而煤矿安全生产是煤炭行业持续发展的前提。近年来,随着煤矿开采深度的不断增加,巷道坍塌、煤矿渗水、瓦斯爆炸等事故时有发生。文献[1]指出,2012—2015 年国家安全生产监督管理总局公布的矿难有 200 起,死亡 1 383 人,煤矿安全形势依然严峻。可靠的透地通信系统是煤矿应急救援的必要通信手段。

自 Nicola Tesla 1899 年提出以大地为传输介质、采用极低频电磁波进行通信的设想^[2]以来,国内外大量学者、机构对电磁波透地通信技术和系统进行了研究。为提高天线利用率和抗干扰能力,文献[3]设计了一种以长度 100 m 的终端短路单极天线作为收发天线的电磁波透地通信系统。文献[4]研究了井下电磁波通信频段及在不同矿井巷道中的衰减情况,分析了频率、巷道截面等因素对电磁波传输的影响。Kutta Technologies 公司开发的 SWECS (Subterranean Wireless Electronic Communication System)透地通信系统能够传送语音、文字和电子文档,并于 2006 年在宾夕法尼亚州矿区进行了透地试验,最大通信距离为 192 m,误码率为 20%^[5]。Lockheed Martin 公司利用甚低频电磁波研发了一种电磁波透地通信系统,于 2010 年在弗吉尼亚州一个矿井中完成了地下 472 m 双向无线文本和语音通信^[6]。

虽然国内外在电磁波透地通信技术研究中取得了一系列成果,但电磁波在透地通信过程中存在以下问题:① 地下环境中的传输媒介特性随时间和地点变化,通信系统稳定性随之发生变化,导致通信信道不稳定。② 地下的黏土、砂粒、岩石和水等媒介吸收电磁波,导致电磁波在地下传输距离有限。③ 在低频透地通信的要求下,天线长度会达到几百米甚至几千米,不易埋设^[7-9]。④ 从发射到接收过程中,电磁波在穿过具有不同电磁特性的岩层时会

发生反射、折射,产生多径效应^[10]。因此,电磁波在透地应急救援方面存在一定缺陷。

磁感应透地通信技术采用磁耦合方式传输信号,不受土壤成分、天线尺寸、传输信道稳定性等影响。文献[11-14]研究了磁感应透地通信在无线地下传感网络中的应用,建立了磁感应透地通信系统信道模型,分析了磁感应透地通信系统的信道带宽、路径损耗、误码率等参数,并提出采用超材料构建球形收发天线来扩大通信距离,改善通信性能^[15],但采用超材料制作的球形天线价格昂贵,不利于生产制造。文献[16-17]提出采用磁感应波导传输和多跳中继技术来提高磁感应透地通信系统通信距离,但天线摆放较为苛刻,系统传播方向单一。文献[18]采用脉冲铁磁体磁场发生器作为发射端,磁敏传感器作为接收端,理论上通信距离可达 1 000 m。Johnson Agbinya 团队研究了基于多输入单输出 (Multiple Input Single Output, MISO)的磁感应透地通信系统,提高了通信系统的传输距离^[19],但没有考虑发射线圈之间互感对通信系统的影响。

本文研究了面向应急救援的磁感应透地通信系统(采用 MISO 模型),研究了 MISO 模型的信道特性和磁感应强度分布情况,给出了相应的磁感应强度和互感表达式,并进行了仿真分析。仿真结果表明,MISO 磁感应透地通信系统路径损耗小;使用灵敏度为 0.01 nT 的磁通门式磁敏传感器作为接收端并配置合适参数时,系统通信距离可达 680 m。

1 磁感应透地通信系统信道模型

在磁感应透地通信系统中,信号通过磁耦合方式进行传输,发射端 T_x 和接收端 R_x 的收发天线为耦合线圈。磁感应透地通信系统信道模型如图 1 所示。

发射端 T_x 和接收端 R_x 均埋在地下,当发射线圈 c_t 通有交变电流时,发射线圈会在其地下周围空间产生交变磁场,而当接收线圈 c_r 处在交变磁场中时,接收线圈会产生感应电流。假设图1中发射线

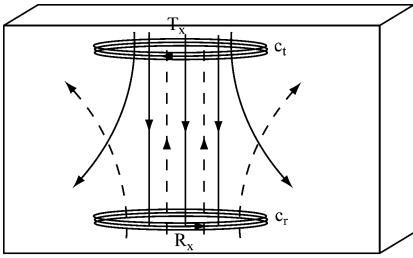


图1 磁感应透地通信系统信道模型

Fig. 1 Channel model of magnetic induction through-the-earth communication system

圈和接收线圈共轴平行,距离为 r ,线圈匝数分别为 N_t 和 N_r ,半径分别为 a_t 和 a_r ,当线圈阻值远小于信号频率和磁导率乘积时,磁感应透地通信系统的路径损耗为^[11]

$$s_{MI} = 6.02 + 60 \lg \frac{r}{m} + 10 \lg \frac{N_t}{N_r \left(\frac{a_t}{m} \right)^3 \left(\frac{a_r}{m} \right)^3} \quad (1)$$

由式(1)可知,磁感应透地通信系统的路径损耗只与通信距离、收发线圈的半径和匝数有关,与传输媒介无关,因此磁感应透地通信系统在地下环境中具有稳定的通信信道。

在磁感应透地通信系统中,接收端接收到的信号强度(接收线圈的感应电压)与磁通量的变化呈正比,而磁通量等于线圈面积与通过该线圈的磁感应强度的内积,因此接收信号强度与磁感应强度有关。发射线圈在地下空间任一点的磁感应强度为^[20]

$$\vec{B} = \frac{\mu N_t S_t \mathbf{I}_t}{4\pi r^3} (\vec{e}_r 2\cos\theta + \vec{e}_\theta \sin\theta) \quad (2)$$

式中: μ 为磁导率; S_t 为发射线圈面积; $\mathbf{I}_t$ 为发射线圈电流; $\vec{e}_r, \vec{e}_\theta$ 分别为沿 r 和收发线圈之间夹角 θ 方向的单位向量。

式(2)表明,收发线圈之间夹角 θ 影响接收端磁感应强度,当 $\theta=0$,即收发线圈共轴平行时,接收端耦合到的磁场最强,接收到的信号最强,因此磁信号传播具有方向性。

虽然磁信号传播不受黏土、砂粒、水分等媒介的影响,但磁信号的路径衰减较快,仅通过增大线圈发射功率来提高通信距离并不能有效改善磁感应通信系统的传输性能。受电磁波通信技术中多天线技术的启发,考虑到发射线圈之间互感影响,本文研究的MISO磁感应透地通信系统可有效减小系统路径损耗,提高磁信号传输距离。

2 MISO 磁感应透地通信系统信道特性

2.1 MISO 模型

本文研究的磁感应透地通信系统为MISO模型,发射端的发射线圈按 $N \times M$ 阵列等间距排列,

且各发射线圈参数相同。所有发射线圈同时发射同一信号,接收端则由1个接收线圈接收信号,如图2所示。其中, NM 个发射线圈 $c_{i,j}$ ($i=1,2,\dots,N$; $j=1,2,\dots,M$) 在同一平面上,半径均为 a_t ,相邻线圈之间距离为 D ($D \geq 2a_t$);接收线圈 c_r 位于发射线圈 $c_{1,1}$ 正上方,半径为 a_r ,其与 $c_{1,1}$ 的距离为 r 。

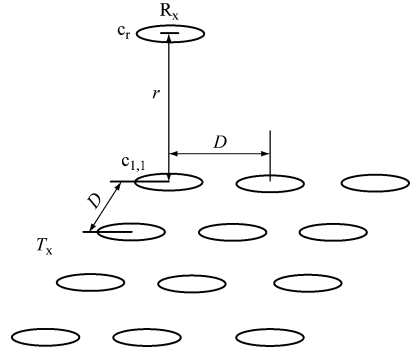


图2 MISO 模型

Fig. 2 MISO model

由于发射端多个发射线圈共面,所以发射线圈之间会产生互感干扰。MISO 模型电路如图3所示。

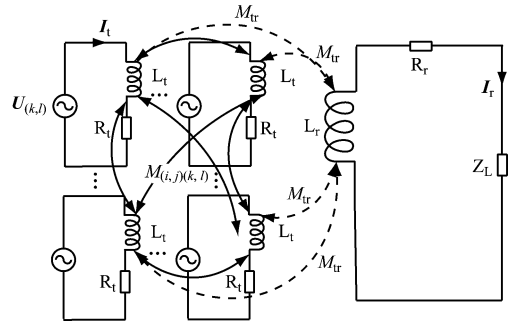


图3 MISO 模型电路

Fig. 3 MISO model circuit

发射端为 $N \times M$ 阵列,每个发射线圈均通有交流电流 $\mathbf{I}_t, U_{(k,l)}$ ($k=1,2,\dots,N$; $l=1,2,\dots,M$) 为发射线圈 $c_{k,l}$ 两端电压, L_t 和 L_r 分别为发射线圈和接收线圈自感, R_t 和 R_r 分别为发射线圈和接收线圈等效电阻。当发射端与接收端的距离远大于发射线圈间最大距离(即 $r \gg D\sqrt{N^2 + M^2}$) 时,每个发射线圈与接收线圈之间互感近似相等,记为 M_{tr} 。 $M_{(i,j)(k,l)}$ 为发射线圈 $c_{i,j}$ 对发射线圈 $c_{k,l}$ 的互感干扰, $\mathbf{I}_r$ 为接收线圈电流, Z_L 为负载阻抗。为使接收端获得较大的接收效率,使 Z_L 与接收线圈阻抗 Z_r 共轭。根据基尔霍夫定律,可得图3的KCL方程:

$$\mathbf{G} \mathbf{A}^T = \mathbf{B}^T \quad (3)$$

式中: $\mathbf{G} = [\mathbf{I}_t \quad \mathbf{I}_t \quad \cdots \quad \mathbf{I}_t \quad \mathbf{I}_r]^T$; $\mathbf{A} =$

$$\begin{bmatrix} Z_t & j\omega M_{(1,2)(1,1)} & \cdots & j\omega M_{(N,M)(1,1)} & -j\omega M_{tr} \\ j\omega M_{(1,1)(1,2)} & Z_t & \cdots & j\omega M_{(N,M)(1,2)} & -j\omega M_{tr} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ j\omega M_{(1,1)(N,M)} & j\omega M_{(1,2)(N,M)} & \cdots & Z_t & -j\omega M_{tr} \\ -j\omega M_{tr} & -j\omega M_{tr} & \cdots & -j\omega M_{tr} & Z_r + Z_L \end{bmatrix},$$

Z_t 为发射线圈阻抗, ω 为发射线圈电流角频率; $\mathbf{B} = [\mathbf{U}_{(1,1)} \quad \mathbf{U}_{(1,2)} \quad \cdots \quad \mathbf{U}_{(N,M)} \quad 0]^T$ 。

接收线圈电流 $\mathbf{I}_r$ 和发射线圈两端电压 $\mathbf{U}_{(k,l)}$ 分别为

$$\mathbf{I}_r = N\mathbf{M}\mathbf{I}_t \frac{j\omega M_{tr}}{Z_r + Z_L} \quad (4)$$

$$\mathbf{U}_{(k,l)} = \mathbf{I}_t \left(Z_t + \frac{NM\omega^2 M_{tr}^2}{Z_r + Z_L} + j\omega \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M M_{(i,j)(k,l)} \right) \quad (5)$$

$i \neq k, j \neq l$

若发射端和接收端的功率分别为 P_t, P_r , 则有

$$P_t = \operatorname{Re} \left[\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M (\mathbf{U}_{(k,l)} \mathbf{I}_t^*) \right] = |\mathbf{I}_t|^2 \left(NMR_t + \frac{N^2 M^2 \omega^2 M_{tr}^2}{2R_r} \right) \quad (6)$$

$$P_r = |\operatorname{Re}[\mathbf{I}_r]|^2 Z_L = N^2 M^2 |\mathbf{I}_t|^2 \frac{\omega^2 M_{tr}^2}{4R_r} \quad (7)$$

由式(4)、式(7)可知,对于发射线圈个数不同、接收线圈个数相同的 MISO 模型,若接收功率相同,则接收线圈电流 $\mathbf{I}_r$ 相同,进而 $N\mathbf{M}\mathbf{I}_t$ 相等。令 $N\mathbf{M}\mathbf{I}_t = \mathbf{I}_T$, 则 $\mathbf{I}_t = \frac{\mathbf{I}_T}{NM}$ 。因此,发射线圈越多,则发射线圈电流越小。此时发射功率可表示为

$$P_t = P_r \left(\frac{4R_r R_t}{NM\omega^2 M_{tr}^2} + 2 \right) \quad (8)$$

当收发线圈距离较远,满足 $2R_r R_t \gg NM\omega^2 M_{tr}^2$ 时, P_t 可近似表示为

$$P_t \approx \frac{4P_r R_t R_r}{NM\omega^2 M_{tr}^2} \quad (9)$$

由式(9)可知,在接收功率为定值的情况下,当满足 $2R_r R_t \gg NM\omega^2 M_{tr}^2$ 时,发射功率近似与发射线圈个数呈反比。因此,当接收功率一定时,增加线圈个数可有效降低发射端功耗。同理,当发射功率为定值时,接收功率与发射线圈个数近似呈正比。

2.2 MISO 磁感应透地通信系统路径损耗

由式(6)、式(7)可知, MISO 模型路径损耗为

$$s = -10\log_2 \frac{P_r}{P_t} = 10\log_2 \left(\frac{4R_r R_t}{NM\omega^2 M_{tr}^2} + 2 \right) \quad (10)$$

对于 3 种磁感应透地通信系统模型: SISO (单输入单输出)、MISO_(1,2) (发射端为 1×2 阵列)、MISO_(2,2) (发射端为 2×2 阵列), 设置参数: 发射、接收线圈半径均为 2 m, 发射、接收线圈匝数均为 2 000, 线圈单位长度电阻为 0.02 Ω/m , 相邻 2 个发射线圈之间距离为 5 m; 发射信号频率为 10 MHz, 大地磁导率(可视为真空磁导率)约为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m。3 种模型路径损耗如图 4 所示。

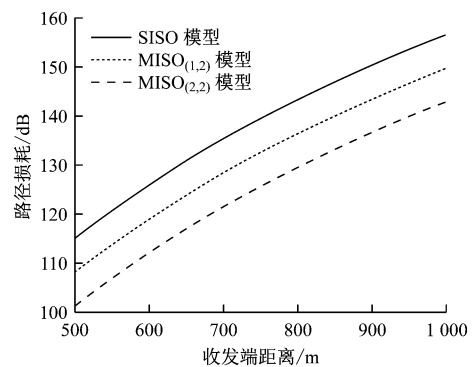


图 4 MISO 模型路径损耗

Fig. 4 Path loss of MISO model

由图 4 可知, MISO 磁感应透地通信系统路径损耗随收发端距离的增加而增大, 随发射线圈个数的增加而减小。

3 MISO 磁感应透地通信系统磁感应强度分布特性

设 $N \times M$ 阵列 MISO 模型发射端位于三维直角坐标系 xoy 平面上, 如图 5 所示。发射线圈 $c_{i,1}$ 圆心位于直角坐标系原点 o 处, 当发射端各发射线圈通有相同电流时, MISO 模型在空间中任意一点 $Q(x, y, z)$ 的磁感应强度公式, 以及 MISO 模型发射端与任意位置的接收线圈之间互感公式分别如式(11)、式(12)所示。

$$\vec{\mathbf{B}}_{N \times M} = \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} \vec{\mathbf{B}}_{c_{i,j}} \quad (11)$$

$$M_{N \times M} = \frac{\mu_0 N_t N_r S_t}{4\pi |C|} \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} F_{c_{i,j}} dx dy \quad (12)$$

式中: $\vec{\mathbf{B}}_{c_{i,j}}$ 为发射线圈 $c_{i,j}$ 在 (x, y, z) 处的磁感应强度, $\vec{\mathbf{B}}_{c_{i,j}} = \frac{\mu_0 N_t \mathbf{I}_t S_t}{4\pi [(x-iD)^2 + (y-jD)^2 + z^2]^{\frac{5}{2}}} \times \{3(x-iD)z\vec{\mathbf{e}}_x + 3(y-jD)z\vec{\mathbf{e}}_y + [2z^2 - (x-iD)^2 - (y-jD)^2]\vec{\mathbf{e}}_z\}$, $\vec{\mathbf{e}}_x, \vec{\mathbf{e}}_y, \vec{\mathbf{e}}_z$ 分别为 x, y, z 轴上的单位向量; $y_1 = y_0 - \frac{1}{A^2+B^2+C^2} \times \sqrt{(A^2+C^2)a_r^2 + (A^2+C^2)a_r^2 B^2}$, A, B, C 为接收线圈在 3 个坐标轴上的余弦, $\sqrt{A^2+B^2+C^2}=1$, 且 $C \neq 0$; $y_2 = y_0 + \frac{1}{A^2+B^2+C^2} \sqrt{(A^2+C^2)a_r^2 + (A^2+C^2)a_r^2 B^2}$; $x_1 = \frac{1}{A^2+B^2} [(A^2+C^2)x_0 - AB(y-y_0) - |C| \times \sqrt{(A^2+C^2)a_r^2 - (A^2+B^2+C^2)(y-y_0)^2}]$; $x_2 = \frac{1}{A^2+B^2} [(A^2+C^2)x_0 - AB(y-y_0) + |C| \times \sqrt{(A^2+C^2)a_r^2 - (A^2+B^2+C^2)(y-y_0)^2}]$; $F_{c_{i,j}} = \frac{1}{[(x-iD)^2 + (y-jD)^2 + Z^2(x,y)]^{\frac{5}{2}}} \{3A(x-iD) \times$

$Z(x,y)+3B(y-jD)Z(x,y)+C[2Z^2(x,y)-(x-iD)^2-(y-jD)^2]\}$, $Z(x,y)=z_0-\frac{A(x-x_0)+B(y-y_0)}{C}$, (x_0,y_0,z_0) 为接收线圈圆心坐标。

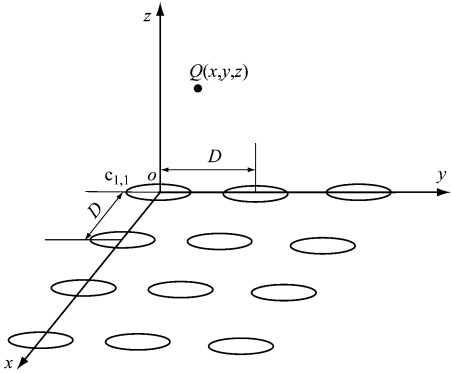


图 5 $N \times M$ 阵列 MISO 模型

Fig. 5 MISO model of $N \times M$ array

当发射端与接收端的距离远大于发射线圈之间最大距离(即 $r \gg D\sqrt{N^2+M^2}$) 时,接收线圈内各个点的磁感应强度近似相等,且每个发射线圈在接收端产生的磁感应强度近似相等,此时式(12)可简化为

$$M_{N \times M} \approx NMM_{tr} = NM \frac{\mu_0 N_t N_r S_t S_r \cos \alpha}{4\pi(x^2+y^2+z^2)^{\frac{5}{2}}} \times \sqrt{(x^2+y^2+4z^2)^2(x^2+y^2+z^2)} \quad (13)$$

式中: S_r 为接收线圈面积; α 为发射线圈 $c_{1,1}$ 的磁感应强度与接收线圈法向量的夹角。

当发射功率 P_t 为定值时,发射线圈电流为

$$|I_t| = \sqrt{P_t / \left(NMR_t + \frac{N^2 M^2 \omega^2 M_{tr}^2}{2R_r} \right)} \quad (14)$$

设 $P_t=1\text{ kW}$,其余参数设置与图 4 相同。根据式(11)、式(14),可得接收端处磁感应强度,如图 6 所示。

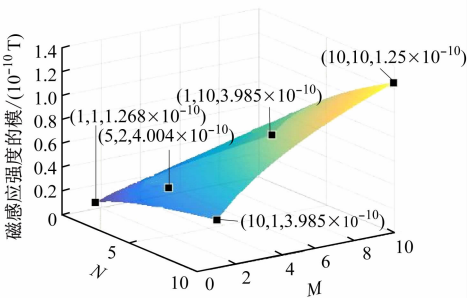


图 6 MISO 模型磁感应强度分布

Fig. 6 Magnetic induction density distribution of MISO model

由图 6 可知,当发射功率相同时,发射端在某一 点的磁感应强度随发射线圈个数的增加而增大。根据式(11)和式(14),个数相同、排列方式不同的发射

线圈,其产生的磁感应强度不同。

当发射功率为 1 kW 时,SISO 模型、 $MISO_{(1,2)}$ 模型、 $MISO_{(2,2)}$ 模型磁感应强度的模与传输距离的关系如图 7 所示。其中横坐标为空间任意一点到 xoy 平面的距离,纵坐标为 z 轴上磁感应强度的模。可看出在发射功率相同的情况下,当传输距离相等时, $MISO_{(1,2)}$ 模型的磁感应强度约为 SISO 模型的 1.4 倍, $MISO_{(2,2)}$ 模型的磁感应强度约为 $MISO_{(1,2)}$ 模型的 1.4 倍,约为 SISO 模型的 2 倍。当采用灵敏度为 0.01 nT 的磁通门式磁敏传感器作为接收端时,SISO 模型的传输距离为 540 m; $MISO_{(1,2)}$ 模型为 600 m,约为 SISO 模型的 1.11 倍; $MISO_{(2,2)}$ 模型为 680 m,约为 SISO 模型的 1.26 倍。因此,MISO 模型可有效提高磁感应透地通信系统的传输距离。

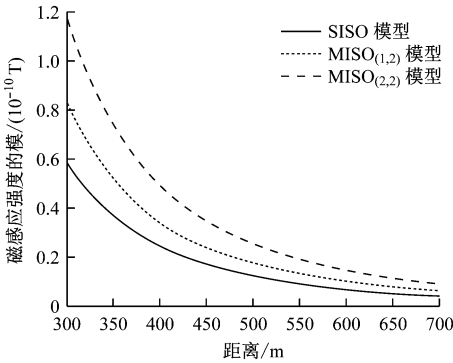


图 7 磁感应强度的模与传输距离的关系

Fig. 7 Relationship between modulus of magnetic induction density and transmission distance

4 结语

(1) 当发射端各发射线圈具有相同电流时, MISO 模型与 SISO 模型相比,其路径损耗明显降低,发射线圈越多,则路径损耗越小。

(2) 当发射功率相同时,接收功率近似与发射线圈个数呈正比,接收端处磁感应强度随发射线圈个数的增加而增大。

(3) MISO 模型能够有效提高磁感应透地通信系统的传输距离,当发射端各发射线圈通有相同电流,并采用灵敏度为 0.01 nT 的磁通门式磁敏传感器作为接收端时, $MISO_{(1,2)}$ 模型的传输距离约为 SISO 模型的 1.11 倍, $MISO_{(2,2)}$ 模型的传输距离约为 SISO 模型的 1.26 倍。

致谢:感谢南京南瑞继保电气有限公司对本研究的资助!

参考文献 (References):

[1] 樊亚庆. 2012—2015 年我国煤矿矿难特征及规律分

- 析[J]. 煤, 2016, 25(5): 16-18.
- [2] 陶晋宜. 甚低频电磁波穿透地层无线通信系统若干问题的探讨[J]. 太原理工大学学报, 2000, 31(6): 690-693.
- TAO Jinyi. Discussion on some questions about through earth radio communication system [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2000, 31(6): 690-693.
- [3] 高劲强, 陶晋宜, 闫兴德. 矿井无线通信系统中电磁波的传输[J]. 电气技术, 2010(12): 35-38.
- GAO Jinqiang, TAO Jinyi, YAN Xingde. Electromagnetic wave propagation of the mine radio communication system [J]. Electrical Engineering, 2010(12): 35-38.
- [4] BAE S, HONG Y K, LEE J, et al. Pulsed ferrite magnetic field generator for through-the-earth communication systems for disaster situation in mines [J]. Journal of Magnetism, 2013, 18(1): 43-49.
- [5] WANG Wenxing, YANG Gongxun, WANG Wenjing. A new communication system based on OFDM in coal mine underground [C]//Asia-Pacific Conference Proceedings, Suzhou, 2005: 1-3.
- [6] GHOSH D, MOON H, SARKAR T K. Design of through-the-earth mine communication system using helical antennas [C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, San Diego, 2008: 1-4.
- [7] VURAN M C, AKYILDIZ I F. Channel model and analysis for wireless underground sensor networks in soil medium [J]. Physical Communication, 2010, 3(4): 245-254.
- [8] DONG X, VURAN M C. A channel model for wireless underground sensor networks using lateral waves [C]// IEEE Global Telecommunications Conference, Kathmandu, 2011: 1-6.
- [9] 郁晓庆, 韩文霆, 吴普特, 等. 土壤不同频率无线地下传感器网络信号传播特性试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 252-260.
- YU Xiaoqing, HAN Wenting, WU Pute, et al. Experiment of propagation characteristics based on different frequency channels of wireless underground sensor network in soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 252-260.
- [10] LI L, VURAN M C, AKYILDIZ I F. Characteristics of underground channel for wireless underground sensor networks [C]//Proceedings of the IFIP Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop, Corfu, 2012: 92-99.
- [11] SUN Z, AKYILDIZ I F. Magnetic induction communications for wireless underground sensor networks [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2010, 58(7): 2426-2435.
- [12] SUN Z, AKYILDIZ I F. On capacity of magnetic induction-based wireless underground sensor networks [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communication, 2012, 131(5): 370-378.
- [13] ZHI S, 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.
- [14] SUN Z, ZHU B. Channel and energy analysis on magnetic induction-based wireless sensor networks in oil reservoirs [C]//IEEE International Conference on Communications, Budapest, 2013: 1748-1752.
- [15] SUN Z, AKYILDIZ I F. Channel modeling and analysis for wireless networks in underground mines and road tunnels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(6): 1758-1768.
- [16] SYMS R R A, YOUNG I R, SOLYMAR L. Low-loss magneto-inductive waveguides [J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2006, 39(18): 3945-3951.
- [17] MASIHOUPUR M, FRANKLIN D, ABOLHASAN M. Multihop relay techniques for communication range extension in near-field magnetic induction communication systems [J]. Journal of Networks, 2013, 8(5): 999-1011.
- [18] BAE S, HONG Y K, LEE J, et al. Pulsed ferrite magnetic field generator for through-the-earth communication systems for disaster situation in mines [J]. Journal of Magnetism, 2013, 18(1): 43-49.
- [19] LI S, SUN Y, SHI W. Capacity of magnetic-induction MIMO communication for wireless underground sensor networks [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015, 2015: 1-9.
- [20] 谢处方, 饶克谨. 电磁场与电磁波 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.