文章编号:1673-5005(2013)06-0031-05 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2013.06.005

基于电共振方法的磁感应通信仿真研究

牛 迪, 双 凯, 李伟根

(中国石油大学地球物理与信息工程学院,北京 102249)

摘要:为了提高磁感应通信系统的通信距离,采用电共振方法进行改进,将其简称为 MIC 通信,分析 MIC 的信道特征并与传统的磁感应通信进行对比。研究表明:电共振方法可以减小磁感应通信系统的路径损耗和误码率,进而增加传输距离;线圈的 Q 值和半径越大以及线圈内阻越小,信号的传输距离越远。

关键词:磁感应通信; 电共振; 信道特征

中图分类号:TN 014 **文献标志码**:A

Simulation research of electric resonance method for magnetic induction communication

NIU Di, SHUANG Kai, LI Wei-gen

(*College of Geophysics and Information Engineering China University of Petroleum*, *Beijing* 102249, *China*)

Abstract: Based on electric resonance technique, this study presents a new communication system (MIC) to improve the communication range in magnetic induction communication system. The channel characteristics of MIC were analyzed and compared with traditional magnetic induction communication systems. The results show that the electric resonance can reduce the path loss and bit error rate, and therefore increase the transmission range. It is also noted that by increasing the Q value and the radius of coil, the resistance of coil is reduced accordingly, resulting in enlarged signal transmission range.

Key words: magnetic induction communication; electric resonance; channel characteristics

磁感应(magnetic induction, MI)通信由于具有信道稳定、小天线尺寸和无多路径损耗的特点,在过去的十年中,逐渐引起了国外研究人员的注意[1-7]。但是,磁场强度的剧烈衰减限制了磁感应通信的广泛应用,目前其多应用于近场通信[8-9]。为了增加传输距离,Sun 等[7,10]用 MI waveguide 来降低路径损耗。但是,这种方法要求所有中继线圈都安置在发射接收线圈的轴向上,其操作复杂。笔者根据电共振[13]的原理设计新型的 MI 通信(简称 MIC),通过对比传统的磁感应通信,MIC 可以大大减小路径损耗,增加传输距离,而且操作方便。

1 磁感应通信系统

磁感应通信的物理原理为法拉第感应定律。图 1(a)所示为传统的磁感应通信系统示意图。在对其分析时,常将其简化成等效的电路模型[7,11](图 1(b))。其中,R_S 为电源的内阻值,Ω;L_1 和 L_1 分别为发射线圈和接收线圈的电感量,H;R_1 和 R_2 分别为发射线圈和接收线圈的阻值,Ω;R_L 为负载的阻值,Ω。为了方便,通常将发射线圈和接收线圈制作成同一尺寸的线圈。

根据基尔霍夫电压定律(KVL),有

$$\begin{cases} V_S = i_1(R_S + R_1 + j\omega L_1) + j\omega M i_2, \\ 0 = i_2(R_2 + j\omega L_2 + R_L) + j\omega M i_1, \\ V_L = -i_2 R_L. \end{cases} \tag{1}$$

式中,V_S 为交流电压, V;ω 为交流电压的工作频率,rad/s;i_1 为发射线圈的电流,A;M 为线圈的互感系数,H。负载电压 V_L 与电源电压 V_S 的电压比为

收稿日期:2013-07-10

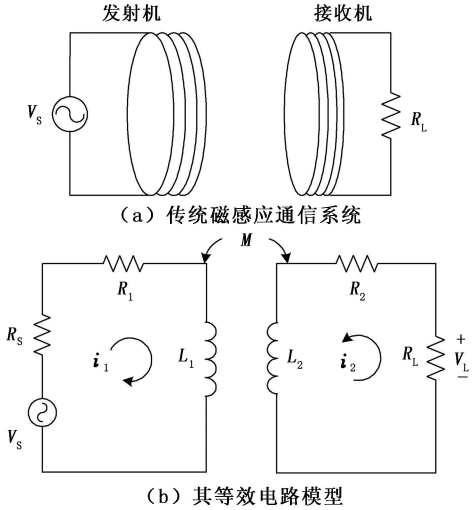
基金项目:国家自然科学基金项目(61072074)

作者简介:牛迪(1985-),男,博士研究生,主要从事电磁场研究。E-mail:everyoungnd@gmail.com。

$$\begin{cases} V_L/V_S = j\omega M R_L/(Z_1 Z_2 + \omega^2 M^2), \\ Z_1 = R_S + R_1 + j\omega L_1, \\ Z_2 = R_2 + j\omega L_2 + R_L. \end{cases} \tag{2}$$

式中,Z_1 和 Z_2 分别为发射机与接收机阻抗,Ω。根据电共振的原理,MIC 在发射电路和接收电路中分别加入电容,如图 2 所示。其中 C_1 和 C_2 为电容,F。两线圈的自然频率满足

$$\omega_0 = 1/\sqrt{L_1 C_1} = 1/\sqrt{L_2 C_2}. \tag{3}$$



(a) 传统磁感应通信系统

(b) 其等效电路模型

图 1　传统磁感应通信系统及其等效电路模型

Fig. 1　Traditional MI communication system and its equivalent circuit model

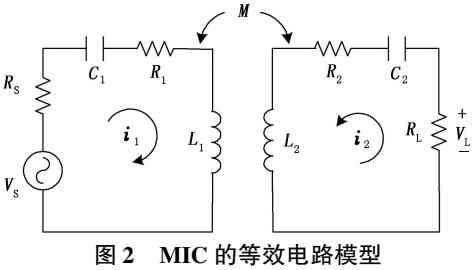


图 2　MIC 的等效电路模型

Fig. 2　Equivalent circuit model of MIC

同理,根据 KVL,有

$$\begin{cases} V_S = i_1\left(R_S + R_1 + j\omega L_1 + \dfrac{1}{j\omega C_1}\right) + j\omega M i_2, \\ 0 = i_2\left(R_2 + j\omega L_2 + R_L + \dfrac{1}{j\omega C_2}\right) + j\omega M i_1, \\ V_L = -i_2 R_L. \end{cases} \tag{4}$$

则电压比为

$$\begin{cases} \dfrac{V_L}{V_S} = \dfrac{j\omega M R_L}{Z_1 Z_2 + \omega^2 M^2}, \\ Z_1 = R_S + R_1 + j\omega L_1 + \dfrac{1}{j\omega C_1}, \\ Z_2 = R_2 + j\omega L_2 + R_L + \dfrac{1}{j\omega C_2}. \end{cases} \tag{5}$$

由于 MIC 是将两个共振电路通过磁场耦合在一起,根据耦合共振的物理原理,可以估计到 MIC 会有两个谐振频率。在仿真研究中,电源内阻 R_S 和负载 R_L 的值为 50 Ω,两线圈电感量 L_1 和 L_2 的值为 20 μH,内阻值 R_1 和 R_2 为 1 Ω,电容 C_1 和 C_2 值为 12.6 pF。由式(5)可以计算出 MIC 的电压比,如图 3 所示。

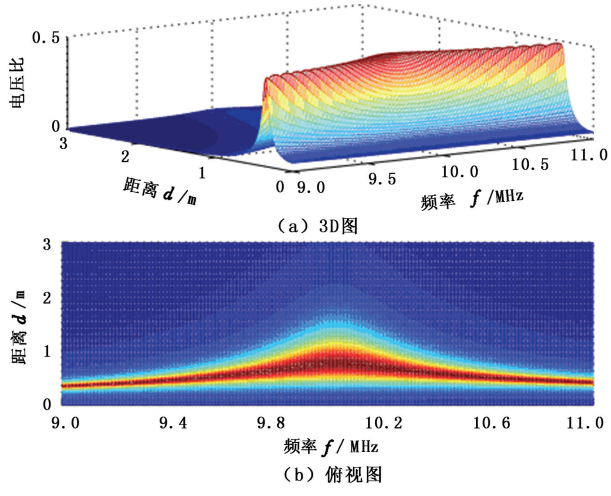


图 3　MIC 的电压比

Fig. 3　Voltage ratio of MIC

显然,MIC 的谐振频率随着信号传输距离的变化而改变。当传输距离 d 很小时,MIC 有两个谐振频率,分布在线圈的自然频率 ω_0 两侧。随着传输距离 d 的增加,两线圈的互感系数降低,两谐振频率逐渐向线圈的自然频率 ω_0 收敛。当传输距离 d 到达临界距离 d_c 时,MIC 的两谐振频率合并为 ω_0,此区域为超耦合域。在这个区域内,各谐振频率点上的电压比几乎保持不变。当传输距离 d 超过临界距离 d_c 时,MIC 的谐振频率仍然为 ω_0,但是谐振频率点上的电压比开始衰减,此区域为低耦合域。

2　MIC 与传统 MI 的信道对比

出于提高传输距离的目的,将重点放在 MIC 系统的低耦合域。在工作频率为 ω_0 的情况下,MIC 和传统 MI 通信系统的接收功率与发射功率比为

$$\frac{P_r}{P_t} = \mathrm{Re}\left(4\left(\frac{V_L}{V_S}\right)^2_{\omega=\omega_0}\frac{R_S}{R_L}\right). \tag{6}$$

其中 P_t 和 P_r 分别为发射功率与接收功率,W。同时,路径损耗为

$$P_{\mathrm{athLoss}} = -10\lg\frac{P_r}{P_t}. \tag{7}$$

由方程(2)和(5),MIC 和传统 MI 通信的功率比以及路径损耗如图 4 所示,总体而言 MIC 的路径

损耗要远小于传统的 MI 通信。

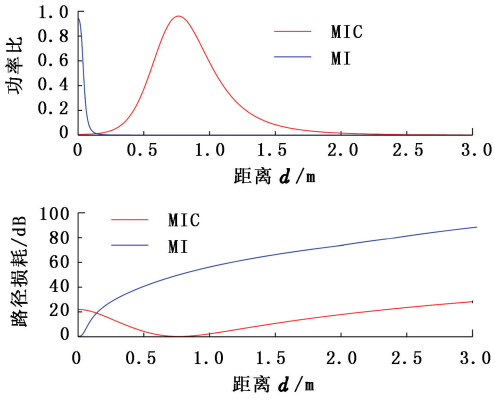


图 4　MIC 和 MI 的功率比与路径损耗对比

Fig. 4　Comparison between MIC and MI

(power ratio and path loss)

根据方程(2)和(5),通过分析 MIC 和 MI 在固定传输距离下的频率响应,可以计算出两者的 3 dB 带宽,如图 5 所示。MIC 的带宽为 258.56 kHz,远小于 MI 通信的 800 kHz 带宽。

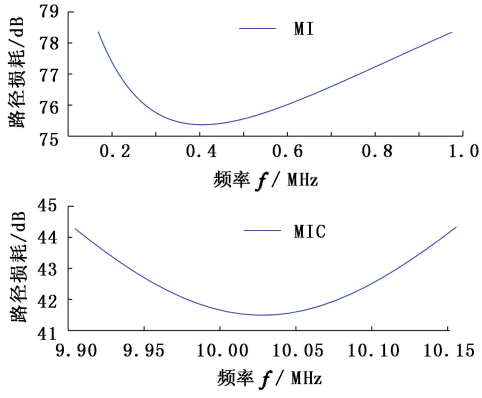


图 5　MI 与 MIC 的 3 dB 带宽

Fig. 5　3 dB bandwidth of MI and MIC

通信系统的误码率(BER)主要受路径损耗、噪声以及信号调制方式 3 个因素决定。由于噪声受环境的影响,不同的环境下其噪声水平都不一样。因此,本文只考虑热噪声,忽略环境中的其他噪声。根据热噪声方程(Johnson-Nyquist noise),有

$$P_N = KTB_\omega. \tag{8}$$

其中 P_N 为热噪声,W;T 为开尔文温度,K;K 为玻尔兹曼常数(1.38×10^{-23} J/K);B_ω 为 3 dB 带宽。仿真中,假设通信系统工作在室温 27 ℃下。除了考虑通信系统在热噪声的影响下的误码率,还假设一个高噪声水平-80 dBm,分析通信系统在这个高噪声水平下的误码率。同时,假设通信系统的发射功率 P_t 为 10 dBm。因此,通信系统的信噪比(R_{SN})为 $R_{SN} = P_t - P_{athLoss} - P_N$。信号的调制方法选择为常用的 2 PSK。从而通信系统的误码率为

$$R_{BER} = 0.5\,\mathrm{erfc}(\sqrt{R_{SN}}). \tag{9}$$

其中 erfc(·)为误差函数。MIC 和 MI 分别在热噪声和-80 dBm 噪声下的 BER 如图 6 所示。可见,在不同的噪声水平下,MIC 的误码率要远远小于 MI 通信系统,因此其通信距离能大于 MI 通信系统。

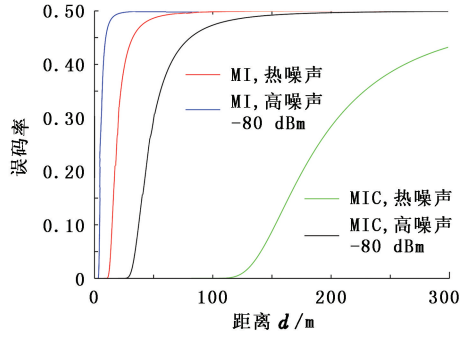


图 6　MIC 和 MI 分别在热噪声和-80 dBm 噪声下的误码率

Fig. 6　BER of MIC and MI with thermal noise and -80 dBm noise

通过分析可见,MIC 比传统的 MI 通信具有一些优势:高功率比,低路径损耗和低误码率。因此,用电共振的方法来实现磁感应通信可以增加通信距离。但是,MIC 的带宽比传统的 MI 通信要窄,只有 258.56 kHz,因此不适用于高速率传输的环境。

3　MIC 通信系统的优化

为了尽可能的提高 MIC 通信系统的通信距离,需要提高 MIC 的功率比,进而需要分析 MIC 的功率比在自然频率 ω_0 下的性质。由方程(5)及(6)可知

$$\begin{cases} \left(\dfrac{P_r}{P_t}\right)_{\omega=\omega_0} = \dfrac{k^2 Q_1 Q_2}{(1+k^2 Q_1 Q_2)^2}\eta, \\ \eta = \dfrac{R_S}{R_S+R_1}\dfrac{R_L}{R_L+R_2}, \\ Q_1 = \dfrac{\omega_0 L_1}{R_S+R_1}, Q_2 = \dfrac{\omega_0 L_2}{R_L+R_2}, \\ k = \dfrac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}. \end{cases} \tag{10}$$

式中,Q_1 和 Q_2 分别为发射电路和接收电路的 Q 值;k 为耦合系数。由于发射线圈和接收线圈尺寸相同,则 $L_1 = L_2$,$R_1 = R_2$。

根据方程(10),提高 MIC 的功率比有两种方案。

方案 1:当 $R_S \gg R_1$,$R_L \gg R_2$ 时,系数 η 可近似为 1,MIC 的功率比可以得到提高。

方案 2:选择合适的 $k^2Q_1Q_2$,使功率比最大。因此,由

$$\frac{\partial}{\partial(k^2Q_1Q_2)}\left(\frac{P_r}{P_t}\right)_{\omega=\omega_0}=0 \tag{11}$$

可知,合适的 $k^2Q_1Q_2$ 为

$$k^2Q_1Q_2=1\ . \tag{12}$$

此时,MIC 的功率最大,约为 25%。由于耦合系数 k 是通信距离 d 的函数[7],则

$$k\approx\frac{a^3}{d^3},\quad (d\gg a). \tag{13}$$

其中,a 和 d 分别为线圈的半径和通信距离,m。在第二节对 MIC 的特性分析中已知,在自然频率 ω_0 下,满足 MIC 的功率比最大的传输距离为临界距离 d_c。因此,由方程(12)可知

$$d_c^3\approx a^3\sqrt{Q_1Q_2}\ . \tag{14}$$

通过增加 Q_1 和 Q_2 值以及线圈的半径 a,可以增加临界距离 d_c,进而可以增加 MIC 的传输距离。仿真结果如图 7 所示,其中 $Q_1=Q_2=Q$。

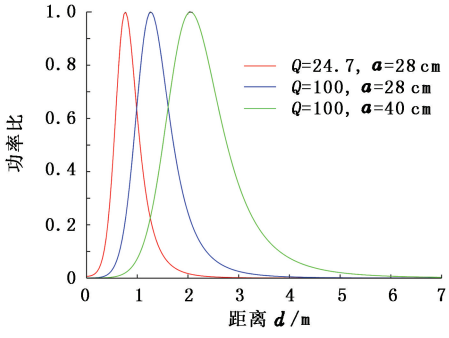


图 7　各关键因素对 MIC 功率比的影响

Fig. 7　Influence of key factors on power ratio of MIC

由仿真结果可见,Q 值和线圈半径越大,临界距离 d_c 就越远,同时在低耦合域 MIC 通信系统的功率比也越大。由方程(7)和(9)可知,功率比越大意味着路径损耗和误码率会越小,通信距离能得到提高。但是,Q 值和线圈半径并不可以无限制地增大,在高频工作时有许多因素对其有所限制:

(1)MIC 的通信带宽限制了工作频率的范围。受趋肤深度的影响,频率越高,线圈绕线中的电流分布越趋向于在绕线的外表面上流动,从而导致线圈的电阻增大和电感减小,因此 Q 值会受到限制。

(2)不能通过无限制地增加线圈的半径和匝数来提高 Q 值。因为随着线圈半径和匝数的增加,线圈的寄生电容会增大。寄生电容应当远小于负载电容 C_1 和 C_2,否则在高频工作时寄生电容会恶化系统的工作性能[7],同时也意味着在高速率的数据传输时,系统的工作性能会受到这些因素的影响。

4　结　论

(1)电共振方法能够降低磁感应通信系统的路径损耗和误码率,因此可以提高通信距离。

(2)估算 MIC 的带宽为 258.56 kHz,远小于 MI 的 800 kHz 带宽。

(3)线圈的内阻越小,MIC 的功率比越大,进而信号传输距离越远;线圈的 Q 值和半径越大,MIC 的功率比也越大,信号传输距离越远。但是,Q 值和线圈半径不能无限制地增大,在高频工作时会有受到通信带宽、趋肤效应以及寄生电容的限制。

参考文献:

[1] AKYILDIZ I F, STUNTEBECK E P. Wireless underground sensor networks: research challenges [J]. Ad Hoc Networks, 2006,4(6):669-686.

[2] AKYILDIZ I F, SUN Z, VURAN M C. Signal propagation techniques for wireless underground communication networks [J]. Physical Communication, 2009,2(3):167-183.

[3] SOJDEHEJ J J, WRATHALL P N, DINN D F. Magneto-inductive communications: Proceedings of MTS/IEEE Conference and Exhibition OCEANS, Honolulu, HI, USA, November 5-8, 2001[C]. Escondido, CA: Holland Publications, c2001:513-519.

[4] GULBAHAR Burhan, AKAN O B. A communication theoretical modeling and analysis of underwater magneto-inductive wireless channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012,11(9):3326-3334.

[5] DOMINGO M C. Magnetic induction for underwater wireless communication networks [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012,60(6):2929-2939.

[6] JACK Nathan, SHENAI Krishna. Magnetic induction IC for wireless communication in RF-impenetrable media: IEEE Workshop on Microelectronics and Electron Devices, Boise, ID, USA, April 20, 2007[C]. Piscataway, NJ: IEEE, c2007:47-48.

[7] SUN Zhi, AKYILDIZ I F. Magnetic induction communications for wireless underground sensor networks [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(7):2426-2435.

[8] BANSAL R. Near-field magnetic communication [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2004,46(2):114-115.

[9] FATIHA E H, MARJORIE Grzeskowiak, STEPHANE Protat, et al. Magnetic in-body and on-body antennas operating at 40 MHz and near field magnetic induction link budget:

proceedings of 6th European Conference on Antennas and Propagation, Prague, March 26-30, 2012[C]. Piscataway, NJ: IEEE, c2012:1-5.

[10] SUN Zhi, WANG Pu, VURAN M C, et al. MISE-PIPE: magnetic induction-based wireless sensor networks for underground pipeline monitoring [J]. Ad Hoc Networks, 2011,9(3):218-227.

[11] AGBINYA J I, MASIHPOUR Mehrnoush. Magnetic induction channel models and link budgets: a comparison between two Agbinya-Masihpour models: proceedings of Third International Conference on Communications and Electronics, Nha Trang, Vietnam, Augest 11-13, 2010 [C]. Piscataway, NJ: IEEE, c2010:400-405.

[12] MEYBODI S, NIELSEN J, BENDTSEN J, et al. Magneto-inductive underground communications in a district heating system: proceedings of IEEE International Conference on Communications, Kyoto, Japan, June 5-9, 2011[C]. Piscataway, NJ: IEEE, c2011:1-5.

[13] FRENCH A P. Vibrations and waves [M]. 1st ed. New York: W W Norton & Company, 1971:103-105.

(编辑　徐会永)

(上接第 30 页)

[15] 吴欣松,魏建新,昌建波,等. 碳酸盐岩古岩溶储层预测的难点与对策[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2009,33(6):16-21.
WU Xin-song, WEI Jian-xin, CHANG Jian-bo, et al. Difficulty and countermeasures in carbonate paleokarst reservoir prediction[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2009,33(6):16-21.

[16] 邬光辉,陈利新,徐志明,等. 塔中奥陶系碳酸盐岩油气成藏机理[J]. 天然气工业, 2008,28(6):20-22.
WU Guang-hui, CHEN Li-xin, XU Zhi-ming, et al. Mechanism of hydrocarbon pooling in the Ordovician carbonate reservoirs in Tazhong area of the Tarim Basin [J]. Natural Gas Industry, 2008,28(6):20-22.

[17] ZHOU Xin-yuan, JIAO Wei-wei, HAN Jian-fa, et al. Tracing hydrocarbons migration pathway in carbonate rock in Lunnan-Tahe Oilfield[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2010,28(4):259-278.

[18] 杨宁,吕修祥,陈梅涛,等. 塔里木盆地轮南、塔河油田碳酸盐岩储层特征研究:以沙 107 井和轮古 40 井为例[J]. 石油实验地质, 2008,30(3):247-251.
YANG Ning, LÜ Xiu-xiang, CHEN Mei-tao, et al. Study of the characteristics of carbonate reservoirs in Lunnan and Tahe oil fields, the Tarim Basin: taking wells S107 and LG40 as examples[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008,30(3):247-251.

[19] 彭守涛,何治亮,丁勇,等. 塔河油田托甫台地区奥陶系一间房组碳酸盐岩储层特征及主控因素[J]. 石油实验地质, 2010,32(2):108-114.
PENG Shou-tao, HE Zhi-liang, DING Yong, et al. Characteristics and major controlling factors of carbonates reservoir in the middle Ordovician Yijianfang formation, Tuofutai area, Tahe Oilfield[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010,32(2):108-114.

[20] 赵文智,朱光有,苏劲,等. 中国海相油气多期充注与成藏聚集模式研究:以塔里木盆地轮古东地区为例[J]. 岩石学报, 2012,28(3):709-721.
ZHAO Wen-zhi, ZHU Guang-you, SU Jin, et al. Study on the multi-stage charging and accumulation model of Chinese marine petroleum: example from eastern Lungu area in the Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012,28(3):709-721.

(编辑　徐会永)