

几种透地通信技术的分析与对比

郝建军, 孙晓晨

(山东科技大学 信息与电气工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:主要分析了天线磁感应方式、地电极电流场方式以及弹性波方式 3 种矿山透地通信技术的工作机理、技术特点以及受分层大地介质信道的影响情况,对比了它们的传输衰减、发送设备体积、发射功率以及能量效率等功能参数,最后得出了结论:3 种透地通信方式都工作在低频波段,天线磁感应方式和地电极方式的传输衰减较之弹性波方式的要小,而弹性波方式和地电极方式所需的发送设备体积比天线磁感应方式的要小;地电极电流场方式能量效率比其它天线磁感应和弹性波方式要高;弹性波方式透地通信受地层力学特性影响太大,尤其是松散介质层。

关键词:透地通信; VLF(甚低频); 传输衰减

中图分类号: TP 391.9

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2014)01-0059-05

Analysis and comparison of several through - the - earth communication technologies for mining

HAO Jian - jun, SUN Xiao - chen

(College of Electric & Information Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Three kinds of through - the - earth communication technology, inductive coupling by antenna, current injection by means of ground electrodes and transmitting by elastic wave, were introduced, as well as the operating principles, performance and characteristics of stratified earth channel were also discussed. And the propagation attenuation, frequency band and power efficiency were analyzed and compared. Conclusions can be drawn as follow: the communication system by ground electrode is more prospecting among the three, though the loop antenna scheme is popular recently; the efficiency of ground electrodes scheme is higher than that of the rest two methods; the communication of elastic wave method is more influenceable by the Mechanics characteristics of the earth layer, especially when it is soil.

Key words: through - the - earth communication; VLF; transmission attenuation

目前国内外正在研究透地通信方式的主要有 3 种: 1) 天线磁感应近场电磁波透地通信; 2) 地电极电流注入的地电极电场透地通信; 3) 以机械振动波为信息载体的弹性波透地通信。天线磁感应方式是当今最为成熟的透地通信技术, 目前国内外大多数研究都集中于这一技术, 而且也已经有了稳定的产品, 如澳大利亚镁思梯(Mine Site Technology)公司的 PED 系统、加拿大 Vital Alert 公司的 Canary 系统, 最近已经能实现短距离语音通信。自 2008 年

开始, 美国的 Lockheed Martin 公司、Stolar 公司以及 E - Spectrum 公司也开发了透地通信产品, 并于 2011 到 2012 年进行了测试。这些新产品中除 E - Spectrum 公司的是地电极方式透地通信系统外, 其余均为天线磁感应方式的^[1]。

从事弹性波透地通信的方式的研究人员并不多, 本课题组从 2008 年起开展弹性波透地通信研究, 取得了一些成就, 但这种方式目前还没有相关产品, 目前也不能支持语音通信。低频电磁波方式

透地通信虽然成熟,能支持语音,但需要尺寸巨大的环形天线,发射功率也很大,后2种方式虽然目前没有成熟的产品,但其具备发送设备体积小、发射功率低的优势.下面分别就这3种方式进行分析.

1 天线磁感应方式

用低频电磁波穿透地层通信的想法最早由 Nicola Tesla 于 1899 年提出.此后,20 世纪 30 年代和 70 年代,美国内政部地矿局组织专家进行了很多尝试,但第一套使用的低频电磁波透地通信系统是南非开发的^[2].

地层介质对电磁波的衰减很大,而且频率越高衰减越严重. W. C. Pritchett 在测试射频电磁波(1.65 MHz)在地层的衰减得到石灰岩中电磁波的平均衰减约为 0.086 Neper/Ft(2.49 dB/m),页岩中平均衰减为 0.231 Neper/Ft(6.6 dB/m)^[3]. 上世纪 70 年代开始,在美国内政部地矿局(Bureau of Mines)的资助下, R. Wait 和 G. Geyer 等对电磁波在大地中传播进行了许多研究^[4-7],得到接收天线的磁场耦合强度算式:

$$H_z = \frac{i\pi a^2}{2\pi s^3} \beta. \quad (1)$$

式中, i 为发射天线电流, a 为发射天线面积, s 为透地深度, β 为大地的衰减因子,

$$\beta = \int_0^\infty \frac{I_1(ax/s)}{(ax/2s)} \frac{x^3}{(x^2 + i\sigma\mu\omega s^2)^{1/2} + x} \times \exp[-(x^2 + is^2)^{1/2}] I_0(0) dx. \quad (2)$$

σ 为岩层介电常数, μ 为介质磁导率, ω 为电磁波角频率, $I_0(x)$ 和 $I_1(x)$ 分别为零阶和 1 阶贝塞尔函数. 当大地为完全绝缘介质时, $\beta = 1$, 此时接收天线上的垂直磁场强度最高, 岩层电导率越大, H_z 越小, ω 越大, H_z 越小.

John Durkin 等根据算式(1)和大地介质实测数据模型^[8-9],得到信号在 630 Hz 时的衰减约 0.1 dB/m, 3 030 Hz 时大约 0.13 dB/m,说明在超低频段段的衰减远低于文献[3]的中频段的衰减.

20 世纪 90 年代澳大利亚镁思梯技术公司开发的 PED(Personal Emergency Device—个人急救设备)应急指挥寻呼系统,单向透地距离可达 800 m,正常通信速率 0.5 byte/s,加拿大 Vital Alert 公司也推出了自己的 Canary 系列透地通信产品. 2005 年 Barkand 等在一个石灰岩矿和运行中的煤矿中对“Telemag”半双工透地通信原型系统进行了测试研究,该系统用 500 Hz 带宽实现了实时语音通信文献[10-11]. 此后 PED 和 Canary2 系统也宣布

能实现短距离语音通信. 2011 年开始 Lockheed Martin 公司、Stolar Horizons 公司、Ultra Electronics 公司等也陆续研制出各自的透地通信系统.

国内从事透地通信持续研究的学者并不多,而且绝大多数都是从事低频电磁波方向的,如张清毅于 1999 年用环形天线方式对透地通信的信道特性进行过研究^[12],陶晋宜于 1999 年到 2000 年对电磁波透地通信方案及系统装置方面进行过研究^[13],陈鹏等从事电磁波透地传输 FDTD 方法模拟的研究^[14].

天线磁感应方式透地通信的优势:1)由于使用的环形天线尺寸很大,因此覆盖区域较大;2)因为地介质电导率越小,电磁波传播衰减越小,因此此透地方式受疏松地层影响较小.

其缺点:1)需要大尺寸天线. 由于天线的尺寸与辐射电磁波的波长相关,低频电磁波的波长很大,因此一般需巨型的环形天线. PED 系统的发射端天线直径一般十几公里,Canary 系统 GO 系列的天线尺寸也需 61 m 直径;2)能量效率低;一般来说发射机应该工作在谐振状态,这样辐射效率会高,但这需要谐振电路的品质因数数值很高,又会影响通信信号的带宽,这是一对无法解决的矛盾.

最近有学者提出的磁导(Magnetic induction)通信方式用于地下通信,如 Jack 等^[15]研究了其用于透地通信的可行性, Sun Zhi 提出了基于磁感应的无线地下传感网络,分析了磁导透地通信的信道模型与系统容量^[16]. Seok Bae 等则设计了一种用于透地通信的铁氧体磁发射天线^[17],这些磁通信技术主要是借鉴了近场磁通信技术,都处于理论探讨或实验室试验阶段,接收端采用效率较高的霍尔传感器、磁通量闸门探测器或螺旋天线,使用极低的信号频率. 而实际上 Lockheed Martin 公司也称他们的 Magnelink 系统是磁通信系统,接收端用的是环形天线,在很低的频率(Very Low Frequency 简称为 VLF)的情况下是磁感应通信.

2 地电极电流场方式

该通信方式是一种利用低频电流信号的透地通信,发送端和接收端都使用插入地下的 2 组电极进行信号的发送和接收,如图 1 所示. 地电极透地通信方式本质是利用电场电流承载信息数据,当载波频率较低时,场电流以传导电流为主,但当载波频率较高时,场电流以位移电流为主,此时导线、电极和大地构成回路相当于环形天线,因此其本质也是近场电磁波通信.

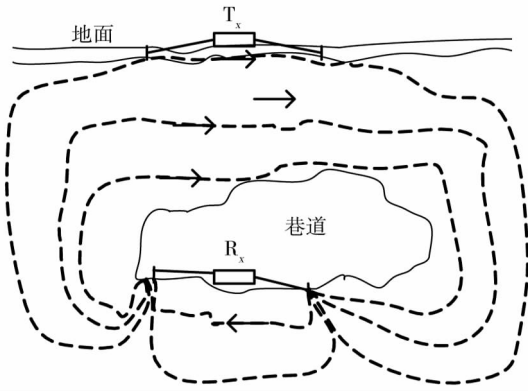


图1 地电极透地通信示意图

这方面最早的研究是从20世纪60-70年代一些学者探索天线埋入地下的传播性能开始的,1996年J. Hurmi等在阿尔卑斯山的Holloch山洞搭建了一套用电极做天线的无线穿岩通信系统,用中继的方式成功地穿透900 m岩层,而用环形天线不能成功^[18].这可能是最早报道的地电极方式透地通信系统.西班牙Zaragona大学的GTE工作小组在这方面进行了很多研究,也开发过TEDRA洞穴通信试验系统^[19].Bataller等在接地阻抗等方面进行过一些研究^[20-21].2003年Gibson指出在VLF波段这种方式比天线磁感应方式具有更高的能量利用效率^[22].

地电极透地通信方式的透地深度与地层的电导率、信号频率、注入大地的电流强度、电极与土壤的接触阻抗以及电极的材质与形状等因素有关,接收机的灵敏度与接收端电极间距和电极与土壤的接触阻抗有关,2电极的距离越远,检测到的电压值越大,电极与土壤的接触阻抗越小,检测到的电压值越大.接收端检测电压为^[23]

$$V_{rx} = \frac{V}{2Z_C} \frac{l_{tx} l_{rx}}{4\pi\sigma r^3} (1 + \gamma r + \gamma^2 r^2) e^{-\gamma r}. \quad (3)$$

式中, V 为发射端2电极间的电压, Z_C 为电极与土壤接触阻抗, l_{tx} 与 l_{rx} 分别为发送端和接收端的电极跨距(同一方向上,如果接收端电极与发送端电极方向不同,则将接收端电极实际跨距乘以与发送电极之间夹角的余弦), r 为接收机所处位置的深度, σ 为大地介质的电导率, γ 为传播因子, $\gamma \equiv j\omega\mu\sigma$, ω 为信号角频率, μ 为大地介质的磁导率.

3 弹性波方式

最早提到利用弹性波进行透地通信的是美国内政部地矿局的资料通报^[24],2005年M. Ge详细地提出了一种关于用对接收信号的处理实现对被困矿工敲击重物产生的振动进行定位的方法^[25],

其原理是利用机械振动产生的弹性波传递信息,本课题组自2008年开始弹性波透地通信技术的研究,在信道特性方面取得了一些成果^[26-29].

弹性波在地层中传播衰减的主要原因有波前扩散、大地介质的分层性、不均匀性、非完全弹性等等,其中波前扩散、散射和介质吸收是造成信号损失的主要因素,尤以地层非完全弹性造成的介质吸收为最.

只考虑介质吸收情况下弹性波在各向同性介质中振幅的衰减为

$$A(x) = -A_0 e^{-\alpha x}. \quad (4)$$

式中, $A_0 = A(x)|_{x=0}$,表示信号源幅度.衰减的快慢取决于系数 α , α 称为弹性波的衰减系数.为了描述介质吸收程度的强弱,引入了一个无量纲的品质因子 Q_E ,它是用来度量介质中振动或波动能量的非弹性衰减率的物理量,是介质所固有的特性.定义 Q_E 为

$$\frac{1}{Q_E} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta E}{E}. \quad (5)$$

式中, E 为地层介质储能, ΔE 为耗散能.

根据Futterman模型^[30],假定弹性波传播速度在每层内是不变的,地震波经过传播 Δz 距离后的波场为

$$P(\omega, z + \Delta z) = P(\omega, z) \exp(j \frac{\omega}{v} \Delta z) \exp(-\omega \tau / 2Q_E). \quad (6)$$

τ 是层内传播距离 Δz 的传播时间, v 是相速度, ω 为角频率, Q_E 是该层的品质因数,因此上式可写成

$$P(\omega, z + \Delta z) = P(\omega, z) \exp\{[1 + \frac{j}{2Q_E}](j\omega\Delta z/v(\omega, z))\}. \quad (7)$$

以矿山上覆层常见的砂岩为例,设砂岩品质因子 Q_E 为40,纵波速度2000 m/s,由式(6)计算出弹性波的吸收衰减:630 Hz,0.212 dB/m,3030 Hz,1.02 dB/s,都大于电磁波的传播衰减.

其实弹性波的传播衰减不只是介质吸收衰减,还包括波前扩散衰减、界面反射衰减以及散射衰减.总体考虑弹性波在浅地层的传播衰减大约2~3 dB/ λ ^[31](不考虑波前扩散).

4 性能对比

3种透地通信方式面临的共同的难题就是地层对传输信号的巨大衰减,以及很不理想的传输特性.但它们在许多方面还是有性能差异.

1) 传输衰减

天线感应方式和地电极方式透地通信究其原理都是近场电磁波通信,因此其传输衰减都由大地介质阻抗决定.但在VLF以下频段地电极方式的

衰减要比天线感应方式小.而弹性波方式的则要比电磁方式通信的衰减大得多,利用文献[23]和[30]中的传输衰减理论模型,以及经文献[8]和[32]得到的实测数据,以及本课题组前期的试验结果数据对模型参数进行了微小的修正,用在山西焦煤集团屯兰矿采的地层砂岩岩样数据,计算得到天线感应透地通信方式的电磁波信号和弹性波透地方式的弹性波信号分别穿越200 m砂岩层的平均衰减情况,如图2所示.

由图2可以看出,弹性波在地层中的传播衰减总体水平较电磁波方式要大,且随频率升高急剧变化,而天线感应的电磁波信号在3 000 Hz之内的衰减比较平坦.这是在200 m连续岩层的假设情况下,如果岩层中间有空隙,弹性波方式的衰减还要大.

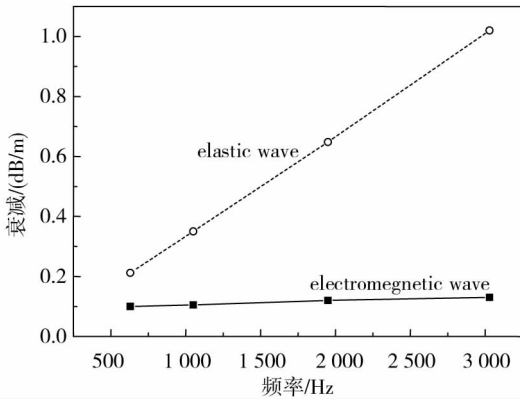


图2 不同频率下弹性波和电磁波穿越200 m砂岩的平均衰减情况

2) 受地层介质特性和层结构影响

大地信道构成为典型层状结构,各层的电学特性和力学特性并不相同,并且地层介质的湿度、温度、应力、孔隙度和松散程度都会对信号的传输产生作用,各种方式的透地通信信号传输都会受其影响.但各种透地通信方式所受地层影响情况是不相同的,弹性波透地通信方式的和地电极方式在ELF(极低频)(或VLF)频段的信号依赖于地层介质传播,其信号传输严重依赖于地层介质,因此受地层影响大,天线磁感应方式的透地通信是靠天线辐射的低频电磁波通信,因而受地介质和地层结构影响较小.对于受地层结构影响大的地电极和弹性波方式,中间煤层和采空层会严重衰减它们的信号强度.如果使用高效率的磁发射和接收天线,磁感应通信的方式会在很大程度上降低信号的传输衰减,这是因为不同的地层介质、空气的磁导率都基本相同,不存在层面反射的问题.地电极方式和磁感应方式都是近场通信,不存在多径效应,但弹性波方

式会有多径效应,也会存在衰落现象.

3) 能量利用效率

地电极注入电流方式的透地通信,其耦合效率与注入大地的电流强度有关,而注入电流的大小取决于接地阻抗,所以这种通信方式的能量效率严重依赖于埋地电极地层介质的阻抗,但总体来讲,在低频频段,地电极方式的能量效率要比天线感应方式高得多,这一点也被J. Humi的试验证实^[18].弹性波能量效率依赖于扬声器与地层介质的耦合效率,如果能解决耦合效率问题.如果采用高效磁感应方式,由于不存在空-地界面反射,因此能量耦合和利用效率最高.单从能量效率来看,弹性波方式的能量效率最差,其他方式效率较高.

4) 设备功率与体积

天线磁感应方式透地通信的天线和发射设备无论体积还是功率都比较大,如PED系统的地面发射机的功率为1 500 W,Canary系列虽然有便携式设备,但其环形天线布置起来直径达61 m,在井下狭小空间内布置起来有一定难度.地电极法透地通信的系统功耗较低,E-Spectrum公司的通信系统地面设备只有十几瓦,设备体积较小,但其地电极需要打入岩石层数米,施工较为困难.弹性波透地通信方式要使用电磁换能设备,发送装置体积虽然不如以上2种方式的大,但功耗却并不逊色.

5 结论

通过以上分析可知,3种透地通信方式的特点是频率越高信号传输衰减越大,但其程度有所不同.与地电极和天线感应的电磁方式相比,弹性波方式在传输衰减和受地层结构(如巷道上方存在采空区)影响方面明显处于劣势;此外,作为灾后应急通信,弹性波发射明显不适合在发生冒顶和冲击地压灾害时使用.但弹性波不受电磁干扰,信号产生简单,在某些应用场合还是有一定用途的.

参考文献:

- [1] Yenchek M R, Homce G T, Damiano N W, et al. NIOSH - Sponsored research in through - the - earth communications for mines: a status report [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48 (5): 1700 - 1707.
- [2] Wadley T L. Underground communication by rocks in gold mines on the witwatersrand [R]. South African Council for Scientific and Industrial Research, Report T. R. L, Johannesburg, South Africa 1946.
- [3] Pritchett W C. Attenuation for radio frequency waves

- through the earth[J]. *Geophysics*, 1952, 17(2): 193 – 207.
- [4] Wait J, Spies K. Sub surface electromagnetic fields of a circular loop of current located above ground[J]. *IEEE Trans Antennas Propagate*, 1972,10: 520 – 522.
- [5] Geyer R G. Constraints of affecting through – the – earth electromagnetic signaling and location techniques [J]. *Radio Science*,1976, 11(4): 323 – 342.
- [6] Wait J R. Electromagnetic surface impedance for a layered earth for general excitation[J]. *Radio Science*, 1980, 15(1): 129 – 134.
- [7] Hill D A, Wait J R. Theoretical noise and propagation models for through – the – earth communication, PB84 – 166628 [R]. The United States National Telecommunications and Information Administration Institute for Telecommunication Sciences. Boulder, The United States, 1982.
- [8] Durkin J. Apparent earth conductivity over coal mines as estimated from through – the – earth electromagnetic transmission tests, PB84 – 213792 [R]. The United States Department of the Interior, Bureau of Mines, Pittsburgh, The United States, 1984.
- [9] Durkin J. Earth conductivity estimates from through – the – earth electromagnetic transmission tests [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1991, 29(2): 300 – 307.
- [10] Chirdon D, Barkand T, Damiano N, et al. Emergency communication and tracking committee underground communication and tracking systems tests at CONSOL energy Inc., McElroy mine, PB2008106975 [R]. The United States Mine Safety and Health Administration, Arlington, The United States, 2006.
- [11] Barkand D, Damiano W, Wesley A, et al. Through – the – earth, two – way, mine emergency, voice communication systems [R]. The United States Department of the Interior, Bureau of Mines, Pittsburgh, The United States,2006.
- [12] 张清毅, 朱建铭. 透地通信信道特性的研究[J]. *电波科学学报*,1999,14(1): 36 – 40.
- [13] 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): 47 – 50.
- [14] 陈鹏, 吴成明. 透地通信的电磁场并行仿真方法[J]. *微电子学与计算机*, 2009, 26(8): 211 – 215.
- [15] Jack N, Shenai K. Magnetic induction ic for wireless communication in rf – impenetrable media, Proceedings of the IEEE Workshop on Microelectronics and Electron Devices[C]. Idaho, The United States, 2007.
- [16] Sun Z, Akyildiz I F. Magnetic induction communications for wireless underground sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, 2010, 58: 2426 – 2435.
- [17] Bae S, Hong Y K, Lee J. Pulsed ferrite magnetic field generator for through – the – earth communication systems for disaster situation in mines [J]. *Journal of Magnetics*. 2013, 18(1): 43 – 49.
- [18] Hunri J, Ebi C. Alpine cave radio earth – current at Holloch[J]. *CREG Journal*, 1996, 25: 4 – 5.
- [19] Villarroel J, Cuchi J, Mediano A, et al. TEDRA, the development of a software defined cave radio[J]. *CREG Journal*, 2007, 67: 77 – 79.
- [20] Bataller V, Munoz A, Molina P, et al. Earth electrode contact measurement in through – the – earth communications. 2009 Conference on Design of Circuits and Integrated Systems[C]. Zaragoza, Spain, 2009.
- [21] Bataller V, Munoz A, Gaudo P M. Electrode impedance measurement in through – the – earth communication applications [J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2012, 6(7): 807 – 812.
- [22] Gibson D. Channel characterization and system design for sub – surface communications [D]. Leeds: United Kingdom University of Leeds, 2003.
- [23] Bataller V, Munoz A, Molina P, et al. Improving medium access in TTE VLF – LF communications [J], *Journal of Commun*, 2009, 4(4): 284 – 294.
- [24] Bureau of Mines Staff, Underground mine communications, control and monitoring[R]. The United States Department of Interior, Bureau of Mines, Pittsburgh, The United States,1985.
- [25] Ge M, Efficient mine microseismic monitoring [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2005, 64(1): 44 – 56.
- [26] 郝建军, 王凤璞. 弹性波透地通信分层大地信道的多径特性[J]. *煤炭学报*,2012,37(4):655 – 699.
- [27] 郝建军, 赵媛, 郭银景. 平面弹性波信号在地层介质中的传输损耗特性[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(增1): 211 – 214.
- [28] 李辉, 郝建军. 透地信道中 BPSK 信号传输特性的实验研究[J]. *矿业工程研究*, 2012,27(3): 73 – 76.
- [29] Hao J J, Pang H L, Li H. Experimental studies on transmission characterization of stratified earth channel in through – the – earth communications with elastic wave[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 734: 2598 – 2602.
- [30] Futterman W I. Dispersive body waves [J]. *Geophys Res*,1962,7(13):5279 – 5291.
- [31] Ünal D. Modeling of seismic wave attenuation in soil structures using fractional derivative scheme [J]. *Journal of Balkan Geophysical Society*, 2005, 8(4): 175 – 188.
- [32] Kennett B, Abdullah A. Seismic wave attenuation beneath the Australasian region [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2011, 58: 285 – 295.