

透地通信系统研究进展

孙红雨¹, 王娜², 郭银景¹, 张计芬¹

(1. 山东科技大学信息与电气工程学院, 山东青岛 266510; 2. 中国石油冀东油田公司档案信息中心, 河北唐山 063400)

摘要: 综述了国内外透地通信技术的发展过程与研究现状, 介绍了最新的透地通信及其相关技术的理论和实验研究成果, 以最具代表性的国际知名透地通信产品 PED 系统、TeleMag 系统、SWECS 系统等产品为例, 对透地通信系统在实际应用中的进展情况进行了阐述。指出目前透地通信系统中存在的信道容量小、抗干扰能力差、天线利用率低等问题, 展望了透地通信技术的发展趋势。

关键词: 透地通信; 煤矿井下通信; 救灾指挥系统; 电磁波; 弹性波

中图分类号: TN929.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2011)03-0079-07

Research Progress of Though-the-earth Communication System

SUN Hongyu¹, WANG Na², GUO Yinjing¹, ZHANG Jifen¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China;

2. Center of Archives Information, East Hebei Oilfield Company, PetroChina, Tangshan, Hebei 063400, China)

Abstract: The development and current situation of through-the-earth communication technology at home and abroad were reviewed. The newest results of theoretical and experimental studies of through-the-earth communication technology were presented and the actual application status of through-the-earth communication system was demonstrated taking several most representative products offered by world-noted manufacturers as samples including the PED (personal emergency device), the TeleMag, and SWECS (subterranean wireless electronic communication system), etc. Finally, the paper pointed out problems existed in actual system, such as small channel capacity, poor anti-interference performance, low antenna utilization, and prospected the future developing trend of through-the-earth communication technologies.

Key words: through-the-earth communication; underground communication in coalmine; disaster rescue command system; electromagnetic wave; elastic wave

矿山灾害发生时, 一些幸存者经常被困在地下, 而由于常规的通信设施也在矿山灾害中遭到破坏, 造成井下及周边地区通信瘫痪, 导致救护人员不能对被困人员的状况、位置有准确的了解, 给救援工作造成了极大的困难。因此, 以大地为信道的透地通信系统被认为是应用于煤炭安全生产和灾后救援的一种安全可靠的通信系统。本文综述了国内外透地通信技术的发展过程与研究现状, 介绍了最新的透地通信及其相关技术的理论、实验研究成果和实际应用进展情况, 总结了目前透地通信系统中存在的问题, 展望了透地通信技术的发展趋势。

1 国外透地通信系统的研究现状

国外早期的透地通信是从研究透地无线电传输机制开始的, Nicola Tesla^[1]在 1899 年就提出采用极低

收稿日期: 2011-01-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(61071087); 山东科技大学科学研究“春蕾计划”项目(2008AZZ06)。

作者简介: 孙红雨(1979—), 男, 山东成武人, 讲师, 博士研究生, 主要从事通信网及信号处理方面的研究。

E-mail: shygy@126.com.

频(ELF, extremely low frequencies)电磁波,以大地为传输介质进行通信的设想。德国著名物理学家阿诺索末菲(Arnold Sommerfeld)和外尔赫尔曼(Weyl Hermann)^[2-3]在假设大地是均匀半空间并具有均匀电特征的情况下,通过精确的数学推导阐述了透地无线电的理论基础。战争的需要也刺激了透地通信技术的发展,第一次世界大战期间,盟军为了与前线保持安全秘密通信,设计了 TPS (telegraphie par sol) 通信系统。该系统采用 500~1 800 Hz 的低频电磁波利用大地信道提供安全通信,最大通信距离为 1 km,由于频率比较低,只能用编码的方式进行传输^[4]。战争期间的另外一个技术创新是法国物理学家利用发明的低频电磁波地音听器来探测战区的地下矿藏和隧道挖掘情况^[5]。但是这种低频电磁波地音听器有很大的局限性,带宽很窄,传输的有用信息少并且抗干扰性很差。因此,人们研究的兴趣开始转向透地无线电。

19 世纪 20 年代开始,美国矿务局成立专家组专门研究透地无线电^[6]。尽管这期间投入了大量的人力、物力、财力,但是并没有开发出实用的透地无线电产品。实际上,当时无线电波是否真的能够穿透大地的问题还没有得到验证^[7]。直到 1930 年,美国矿务局的地球物理学家 Wallace Joyce^[8]才通过实验证实了无线电波确实能够穿透大地。他精心设计大量的实验,使用不同形状和尺寸的环形天线,采用 500~810 Hz 之间不同频率的无线电波穿透石灰岩和砂岩,证明了无线电波确实能够穿透岩石和地层。最好的实验结果是 500 Hz 的低频信号,透地深度达 274 m。自 1930 年到第二次世界大战结束,透地无线电的研究进展非常缓慢。

1949 年,南非工程师 Wadley^[9]研制成功第一个真正意义上的透地通信系统:采用频率为 300 kHz 的低频电磁波,有效通信距离 300 m,最大通信距离可达 2 100 m。在此基础上,南非开发了一种可以在矿山实际应用的系统,并在 1961 年通过了认证,在矿井的抢险救灾中起到了较大的作用^[10]。Wait 等^[11-16]围绕环形天线在透地通信中的应用开展了系列试验与理论研究,建议采用架设在煤矿顶板或是支护上的小型环形天线实现上行透地通信,在均匀各向同性地层条件下计算了方环天线的输入阻抗和发射功率,并且在二层简化地层模型下求解了垂直极化磁偶极子的复杂电磁场问题。Viggh^[17]在三层简化模型基础上用解析方法研究了频率为 1k~10M Hz 的平面波在平行分层地层中的传播特性。透地通信分为下行(地面—地下)、上行(地—地面)以及上下行双向通信,Geyer^[18]、Olsen^[19]以及 Farstad^[20]的试验研究表明线天线适用所有的透地通信方式。1974 年美国西弗吉尼亚大学工程实验站对电磁波透地矿井通信中的要素进行了探讨。这个工作组主要致力于上行数据、下行声音、巷道警报编码呼叫和地面语音呼叫四个透地通信系统的研究,利用矿井覆盖层、煤炭、岩石作为信号传输的媒介,用电感耦合实现了与地表的通信^[21]。1975 年 5 月,美国研究与开发协会向国防核武器局提出并公布了题为“透过导电地层的电磁通信”的研究报告,借助透过地层的电磁信号来实现地下核爆炸时可靠的信息传输。1978 年美国矿务局开发了一个电磁定位系统用于定位在矿井中被困的矿工^[22]。这一发展计划制造出一种功率低重量轻的收发器,它可以附带在矿工安全带上,接收器和发射器可以穿透地面进行通信。该透地通信设备在美国许多煤矿中进行了现场测试。经测试,该设备透地深度可达 426.7 m。

在此期间,前苏联也发表了大量有关地下通信的论文及研究报告,并召开过全苏地下通信会议。Large 等^[23]通过对环状天线在不同参数条件下、在三层媒质中形成磁场的数值分析,对透地通信系统的信道特性,特别是系统工作频率、媒质电导率、发射天线尺寸、形状及其放置方式对地下电磁波传播的影响进行了研究。1978 年,Murphy^[24]受 IEEE 年度大会邀请发表的综述性文章对 20 世纪 60、70 年代关于地下通信研究和发 展情况进行了总结。这以后,关于透地通信的研究逐渐降温。

近年来,随着通信技术和煤炭行业的迅速发展,关于透地通信技术的研究又进入一个新的活跃时期。1988 年美国密歇根大学的 Ristenbatt 等^[25]提出一种新的灾后矿井通信系统,使用 1 950 Hz 的透地电磁波传递载波,采用重复 255 bit 最大长度序列的相位调制,对从矿井到地面的灾后通信系统进行了探讨。该系统输入信噪比降低至 -30 dB,这比当时的脉冲发射系统的要求大约低 30 dB,大幅提高了通信的可靠性。1990 年,澳大利亚 Mine Site Technologies 公司开发了井下无线通信与紧急救援指挥系统(personal emergency device, PED)^[26]。该系统采用 400~1 000 Hz 的超低频信号,平均透地深度在 800~1 100 m,井下人员无论处于任何位置都可以通过安装在头盔上的小型天线接收到信号。

1995 年,美国科尔切斯特绿山无线电研究公司(Green Mountain Radio Research Company, Colchester)

研究了无线透地通信中的信号处理。将自适应噪声抵消、最大似然检测、非线性处理和自适应反馈结合在一起,用于去除噪声。测试证明信噪比能改善 10 ~ 24 dB,低噪音水平为更高的数据传输率、规模较小的发射机和天线研究提供了可能^[27]。1999 年,南非科学与工业研究委员会矿业技术部(CSIR Miningtek, the Council for Scientific and Industrial Research Miningtek)开发了一套被困矿工定位设备,原型系统顺利地经过地下实地测试,能够透过 30 m 的岩层定位被困矿工。该系统由便携式搜索单元和一个可以穿戴在矿工身上的特殊编码标签组成,标签装在一个金属带扣上,金属带扣上还安装了一个 LED 发光二极管和蜂鸣器^[28]。2002 年加拿大采矿、冶金、石油协会的 Wayne 等^[29]研究人员提出了一个新型的地下通信系统,该系统应用于整个矿井的疏散和安全生产工作,利用透地通信的基础设施,通过中心控制设施能够在几秒内将紧急情况通知给所有的矿工或者从他们那里获取位置等信息,这个系统不需要任何电缆或其他有线传输介质。

2004 年,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室 Vasquez 等^[30]提出了一种在井下区域进行语音通信的方法。该方法将语音压缩为 500 Hz 带宽的数字信号后加载在透地载波上实现地上地下的通信,地下信号接收部分是采用的高温超导量子干涉仪(HT-SQUID)技术来实现的。该系统音频信号已经能够通过坚硬的岩石在 100 m 以外成功接收。

2006 年,美国劳工部矿山安全和卫生行政部门在研究了 3 ~ 8 kHz 上甚低频无线电信号的传播特性的基础上,提出了无线透地语音通信系统^[31]。证实了这些无线电频率在实时语音通信系统中可以透地传播。讨论了用于矿井测试的双路语音透地系统模型,提到了透地深度、电磁干扰的限制和容许性的要求。

Kutta Technologies 公司为美国军方开发的 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,2006 年该系统在美国宾夕法尼亚州 Consol Energy's Enlow Fork 煤矿试验,得到了较为理想的结果,双向文字信息通信距离 177 ~ 192 m,每分钟传送 20 ~ 30 个字符,20% 的误码率^[32]。

美国 Transtek 公司(<http://www.kuttatech.com>)生产的 TeleMag 是一套低频电磁波双向语音通信的透地通信系统,系统采用半双工通信模式,工作频率为 3 ~ 8 kHz。地面和井下设置直径 18.3 m 的环形天线,利用 DSP 滤波技术消除噪声,最大通信距离 305 m,2006 年样机测试双向通信能穿透 85 m 的地层^[32]。

Vital Alert 公司开发的 Canary Mine Messenger 透地通信系统,采用 3 ~ 30 kHz 的甚低频电磁波,利用带放大器的铁棒天线代替了环形天线。2007 年,Canary 2 代产品在美国职业安全健康研究所(NIOSH, National Institute for Occupational Safety and Health)指定的测试点美国宾夕法尼亚州 Lake Lynn 煤矿测试显示,Canary 2 代产品透地距离 113 m,可以双向语音通信^[33]。

在美国职业安全健康研究所(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)的基金支持下,2009 年,Transtek 公司开发的下一代 TeleMag 系统在美国一个煤矿测试达到 NIOSH 防爆要求。系统利用 DSP 数字压缩技术,能够传输双向语音,通信距离超过 183 m。Transtek 公司官方表示他们的目标是透地深度达到 366 m^[32]。2009 年,Vital Alert 公司上市的 Canary 系列最新产品能够传送语音信号的距离超过 100 m,传送文字信息的距离超过数百米,数据传输率达 2 400 bps,采用的频率是 2 ~ 6 kHz^[33]。

2 国内透地通信技术研究现状

国内在透地通信系统方面的研究相比国外落后很多,在引进国外应急救援系统的同时,开展了一些应用系统和理论研究工作。在“七五”期间,我国曾设立国家攻关项目开展煤矿中频无线通信系统研究,并在 1991 年通过国家鉴定。它采用频率为 500 kHz 背心式环形天线窄带调频、异频单工方式,在有拐弯的巷道中,两手机最远通信距离大于 1.2 km,穿透煤层有效通信距离大于 70 m,穿透岩层有效通信距离大于 58 m。在矿井透地实用系统开发方面,机电部 36 所与淮南无线电一厂合作开发的 KT2007 中频地下无线电通信装置,在 1992 年 12 月通过国家鉴定。它采用频率为 400 ~ 630 kHz,调制方式为单边带,背带环形天线,通信距离在 1 km 左右,也具有穿透煤层和岩石的通信能力,但其穿透能力很弱。1993 年 8 月,煤科总院常州自动化研究所与锦州煤炭通信器材厂合作研制的 KTY3A 型矿用无线电电话机通过鉴定,它采用的频率为 455 ~ 512 kHz 同频单工工作方式、窄带调频、磁棒天线^[34]。2000 年,由国家经贸委组织,列入国家技术创新

项目计划,由原属于国家煤炭工业局下属的煤炭科学研究所和煤炭通信信息中心成立的天地科技股份有限公司与北京鑫吉美通信技术有限公司研制了新型的“矿井多功能移动与救灾通信系统”。该系统采用漏泄电缆作为传输信息的共同通道,实现矿井无线电双向通信。2000年6月该系统在山西省西山矿务局西铭煤矿第一水平主巷道进行传输距离2 km的试验,通信效果良好^[35]。

理论研究方面,张清毅等^[36]对大型环状发射天线情形下的媒质电导率、发射天线尺寸、形状及其放置方式对地下电磁波传播的影响进行了探讨。陶晋宜^[37]根据穿透地层无线通信的特点,采用终端短路单级天线及单边带调制和弱信号接收技术,提出一种可行的穿透地层矿井无线电通信系统的方案。司徒梦天^[38]采用多元制移频键控并适当降低信息传输速率来解决透地通信中的弱信号接收问题,并采用时间分集、择优判决技术来克服抗雷电脉冲干扰。向新等^[39]利用电流场实现穿透地层的地下通信,并在恒流场电磁波传播模型下分析得出电流场的场强随传输距离的3次方成反比以及与发射偶极子电极的大小成正比等关系。王文星等^[40]研究了基于OFDM技术的矿井通信系统,该系统通过串联适配器将有线通信与无线通信相结合,无线通信系统主要包括透地通信、感应通信和微波通信系统等。郭银景等^[41]利用低频弹性波(声波)在地壳中传输衰减相对较小的特性,提出了一种弹性波透地通信系统方案。

3 透地通信主流技术及研究热点

3.1 甚低频或超低频电磁波

以大地为电磁波传播媒介,利用电磁波穿透大地的无线通信原理,采用甚低频(very low frequency, VLF)(3 ~ 30 kHz)或者超低频(ultra low frequency, ULF)(300 ~ 3k Hz)电磁波进行透地通信,这种透地通信系统一般在地表或者地下配置非常大的环形天线,长度达数千米,地下的接收器能够收到天线辐射的信号,大多数这类系统都是单向的系统。系统主要包括地面大功率发射机、发射天线、大地无线信道、接收天线和接收机五个部分。当紧急情况发生、其他通信方式完全瘫痪时,通过地面发射系统,使超低频信号穿透岩层到达井下任何位置,从而可以迅速有效地与井下人员进行通信。

这类电磁波透地通信系统研究的热点主要集中在如何提高天线的利用率,增强抗干扰能力,提高信道容量,电磁波的频段选择、双向通信等方面。文献^[37]为了提高天线的利用率,增强抗干扰能力,重点在天线的形式选择、发送信号的调制方式和提高接收信噪比等方面进行考虑,采用100 m长的终端短路单极天线作发射接收天线,设计了一种电磁波透地通信系统。文献^[42]研究了矿井无线通信的频段以及电磁波在矿井矩形、拱形巷道内的传输衰减,分析了在矿井巷道内频率、截面、弯曲、分支、支护等多种因素对电磁波传输产生的影响。2008年7月美国锡拉丘兹大学的Ghosh Debalina等^[40]在IEEE天线与传播学会国际学术研讨会上提出使用螺旋天线的透地矿井通信系统设计方案。矿井下的发射机采用螺旋天线发射电磁波,矿区地面上设计合理的接收机,能够有效地维持与地下发射机的通信。美国的洛克希德·马丁公司(Lockheed Martin)^[43]利用甚低频电磁波具有强穿透性的特点,研发出一种名为MagneLink的电磁波透地通信系统,可以穿透地层进行双向无线语音和文本通信,以满足采矿业发生意外事件以后的应急通信需求。目前这套系统经过了三次深井测试:2009年12月,在宾夕法尼亚州的一个矿井中展示了其语音和文本通信功能;2010年3月,在弗吉尼亚州的一个矿井中,成功地在1 550英尺(约472 m)的地下实现双向无线文本和语音通信;2010年6月成功地实现了多单元组网并与地面通信系统接通并网的实验。

3.2 弹性波

弹性波(elastic wave)透地通信是一种新的透地通信技术,一直以来,国内外对弹性波在大地中传播特性的研究主要集中在地震波和其他低频弹性波(<100 Hz)方面。资料显示,10 Hz左右的地震波能够在地壳中传输几万千米,100 Hz左右的地震波能够在地壳中传输几千米。弹性波透地通信的优点是在大地中具有较为优良的载波特性,比电磁波更容易与大地介质耦合,使能量的利用效率大大提高。缺点就是弹性波在大地中传输的多径效应、反射损耗、吸收损耗、散射损耗和压电效应与地层相关的参数与信号衰落的关系还没有建立一个完善的模型。图1是郭银景等^[41]提出的声波透地通信系统组成结构图,主要包括调制器与功率放大器、地耦合扬声器、地耦合拾音器、低噪声放大器与选频滤波器、解调器、数字信号处理器等。

弹性波透地通信系统研究的热点集中在弹性波透地信号的接收方法、大地信道探测方法、大地介质的压电效应和多径效应以及各种损耗与地层相关的参数与信号衰落的关系等方面。文献[45]提出了一种弹性波透地信号的分集接收方法,它采用多模式接收和多频点接收分集的方式,在大地信道接收端将分散在各个频点和各个传输模式中的信号有机地融合在一起,从而提高了接收端的信噪比。该方法收集分散在各个模式和频点上的信号能量,以提高接收增益,并通过分集合并多模和多频信息,抑制弹性波在大地介质中的衰落,最终达到提高接收机检测性能的目的。文献[46]提出了一种基于 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 的声波透地通信方案,分析了大地信道的信道特性,包括大地介质的压电效应,吸收、反射、折射传输损耗和由层间反射、纵波分裂造成的多径效应;利用 Chirp 和 CHEC 联合探测的方法找到了最佳频段,进行子信道划分后,再用误码计数探测了信道性能。

4 结束语

现有的透地通信系统绝大部分都是利用电磁波的传播原理,采用甚低频或者超低频电磁波进行透地通信,这种透地通信系统一般在地表或者地下配置非常大的环形天线,地下的接收器能够收到天线辐射的信号,大多数这类系统都是单向的。因为地上与地下是单向通信,所以不能确认地下是否能够接收到信号,多数情况下信号不能同时发送和接收。另外,这类系统对配电设备的干扰比较敏感,也会对已有的通信和控制设备产生干扰;地表天线长度达 12 km,铺设起来比较复杂;信道容量小,通信距离短,信号覆盖范围很难预测,一些死角或者屏蔽区域常没有信号。

目前,国内外对透地通信的研究多是集中在利用低频电磁波进行透地通信,利用低频弹性波(声波)进行透地通信的研究还很少。研究发现,低频弹性波在地壳中传输衰减相对较小,说明弹性波在大地中具有较为优良的载波特性,因此弹性波透地通信将是新的突破点。

参考文献:

- [1]WHEELER H A. Radio wave propagation in the earth's crust[J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1961,65(2):189-191.
- [2]SOMMERFELD A M. The propagation of waves in wireless telegraphy[J]. Annals of Physics,1926,81:1153-1367.
- [3]PITTMAN W E, CHURCH R H, MCLENDON J T. Through-the-earth electromagnetic trapped miner location systems [R]. Tuscaloosa;Bureau of Mines,1985.
- [4]DEBETTENCOURT J T,SUTCLIFFE R A. Studies in deep strata communications[R]. Cambridge,USA: Air Force Cambridge Reseach Lab,1962.
- [5]LEIGHTON A. Application of the geophone to mining operations[R]. Michigan,USA;Bureau of Mines,1922.
- [6]COLBURN C L, BOUTON C M, FREEMAN H B. Experiments in underground signalling with radio sets[R]. Alaska, USA;Bureau of Mines,1922.
- [7]ILSLEY L C, FREEMAN H B, ZELLERS D H. Experiments in underground communications through earth strata[R]. Alaska,USA;Bureau of Mines,1928.
- [8]JOYCE J W. Electromagnetic absorption by rocks with some experimental observations taken at the mammoth cave of Ken-

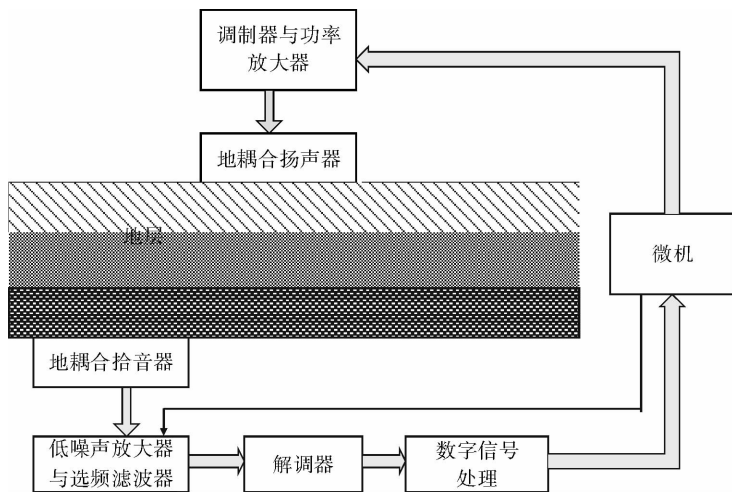


图 1 声波透地通信系统组成框图

Fig. 1 The block diagram of composition of earth-penetrative communication system with sound waves

- tucky[R]. Alaska, USA; Bureau of Mines, 1931.
- [9] WADLEY T L. Radio communication through rock in the Witwatersrand Mines[R]. Pretoria: Council For Scientific and Industrial Research (South Africa), 1949.
- [10] VERMEULEN D J, BLIGNANT P J. Underground radio communication and its application for use in mine emergencies [J]. The South African Institute of Electrical Engineers, 1961, 52(4): 94-106.
- [11] WAIT J R, SPIES K P. Electromagnetic field of a small loop buried in a stratified earth[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1971, 21(5): 717-718.
- [12] WAIT J R. Criteria for locating an oscillating magnetic dipole buried in the earth[J]. Proceedings of IEEE Letters, 1971, 59(6): 1033-1035.
- [13] WAIT J R. Electromagnetic induction technique for locating a buried source[J]. IEEE Transactions on Geoscience Electronics, 1971(9): 95-98.
- [14] WAIT J R. Locating an oscillating magnetic dipole in the earth[J]. Electronics Letters, 1972, 8(16): 404-406.
- [15] WAIT J R, SPIES K P. Low-frequency impedance of a circular loop over a conducting ground[J]. Electronics Letters, 1973, 9(15): 346-348.
- [16] WAIT J R, HILL D A. Field of a horizontal loop of arbitrary shape buried in two layer earth[J]. Radio Science, 1980, 15(5): 903-912.
- [17] VIGGH M. Modes in lossy stratified media with application to underground propagation of radio waves[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1963, 11(3): 318-323.
- [18] GEYER R G. Theory and experiments relating to electromagnetic fields of buried sources with consequences to communication and location[C]//Proceedings of Through-the-earth Electromagnetic Workshop, Golden, Colorado, USA, 1973: 20-33.
- [19] OLSEN R G, FARSTAD A J. Electromagnetic direction finding experiments for location of trapped miners[J]. IEEE Transactions on Geoscience Electronics, 1973, 11(4): 178-185.
- [20] FARSTAD A J. Electromagnetic location experiments in a deep hard rock mine[R]. Alaska, USA; Bureau of Mines, 1973.
- [21] LAGACE R L. Report highlights of the working group on electromagnetic through-the-earth mine communication links[J]. West Virginia University Engineering Experiment Station Bulletin, 1974, 7(114): 21-24.
- [22] KALVELS D, FARSTAD A J. Trapped miner through the earth communication in coal mines[C]//Proceedings of the 4th Conference on Coal Mine Electrotechnology. Morgantown, West Virginia, 1978: 2-4.
- [23] LARGE B D, BALL L. Radio transmission to and from underground coal mines-theory and measurement[J]. IEEE Transactions on Communications, 1973, 21(3): 194-202.
- [24] MURPHY J N, PARKINSON H E. Underground mine communications[J]. Proceedings of IEEE Letters, 1978, 66(1): 26-50.
- [25] RISTENBATT M P, HOLLAND M E, METZGER K. A new post-disaster mine communication system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1988, 2(24): 204-211.
- [26] 彭立军. PED 井下无线通信的发展[J]. 科技情报开发与经济, 2003, 13(5): 168-169.
PENG Lijun. The development of PED wireless undermine communication [J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2003, 13(5): 168-169.
- [27] RAAB F H, JOUGHIN I R. Signal processing for through-the-earth radio communication[J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43(12): 2995-3003.
- [28] KONONOV V A. Develop a trapped miner location system and an adequate strategy and associated technologies[R]. Pretoria, South Africa; Safety in Mines Research Advisory Committee, 1998.
- [29] WAYE P M Y, YEWEN R. Technological advances in telecommunications for mines[R]. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2002.
- [30] VASQUEZ J, RODRIGUEZ V, REAGOR D. Underground wireless communications using high-temperature superconducting receivers[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2004, 1(14): 46-53.
- [31] BARKAND T D, DAMIANO N W, SHUMAKER W A. Through-the-earth, two-way, mine emergency, voice communication systems[C]//Industry Applications Conference, 41st IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2006 IEEE. Tampa, Florida, 2006: 955-958.

- [32] BOB N. TRANSTEK[EB/OL]. [2010-12-28]. <http://www.transtekcorp.com/index.html>.
- [33] PIERRE L E. Summary study of underground communications technologies[R]. Ottawa, Ontario, Canada: CANMET Mining and Mineral Sciences Laboratories, 2009.
- [34] 吴荣光. 地下无线通信的发展过程及其展望[J]. 通信世界, 2000(6): 34-35.
WU Rongguang. Development and prospect of undermine wireless communication[J]. Communications World, 2000(6): 34-35.
- [35] 吴荣光. 煤炭专用通信网现状及发展[J]. 通信市场, 2001(1): 20-23.
WU Rongguang. Current situation and future of coal mine communication net[J]. Communication Market, 2001(1): 20-23.
- [36] 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, 1(14): 36-40.
ZHANG Qingyi, ZHU Jianming. Study on propagation characteristics of the VLF through the earth communication channel [J]. Chinese Journal of Radio Science, 1999, 1(14): 36-40.
- [37] 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.
TAO Jinyi. Discussion on some questions about through earth radio communication system[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2000, 31(6): 47-50.
- [38] 司徒梦天. 解决地下通信技术难题的方案及关键设备[J]. 中国工程科学, 2001, 3(7): 64-69.
SITU Mengtian. The technical scheme and key equipment for solving the difficult technical problems of underground radio communications[J]. Engineering Science, 2001, 3(7): 64-69.
- [39] 向新, 罗奕, 易克初. 穿透岩层地下电流场通信信道分析[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(4): 77-79.
XIANG Xin, LUO Yi, YI Kechu. Channel analysis on underground mine communication by electrical field through stratum [J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(4): 77-79.
- [40] WANG W X, YANG G X, WANG W J. A new communication system based on OFDM in coal mine underground[C]// Proceeding of Asia Pacific Microwave Conference, IEEE, Suzhou, 2005: 1606628.
- [41] 郭银景, 郝建军, 王凤瑛, 等. 一种透地通信系统[P]. 中国, 200810158220. 1, 2009-03-01,
- [42] 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, 1(12): 35-38.
GAO Jinqiang, TAO jinyi, YAN xingde. Electromagnetic wave propagation of the mine radio communication system[J]. Electrical Engineering, 2010, 1(12): 35-38.
- [43] GHOSH D, HONGSIK M, SARKAR T K. Design of through-the-earth mine communication system using helical antennas [C]// IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting. San Diego, 2008: 4619015
- [44] MagneLink Magnetic Communication System[EB/OL]. [2010-12-28]. <http://www.lockheedmartin.com/products/MagneLink>.
- [45] 郭银景, 吕文红, 郝建军, 等. 一种弹性波透地信号的分集接收方法[P]. 中国, 201010166130. 4, 2010-09-08.
- [46] 邓敏. 基于 OFDM 的声波透地通信相关技术的研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2009.