

文章编号:1671-251X(2017)10-0048-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2017.10.010

煤矿井巷自适应多天线理论与关键技术研究

霍羽^{1,2,3}, 张毅³, 徐钊³, 高敏^{1,2,4}

(1. 中国矿业大学 物联网(感知矿山)研究中心, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 矿山互联网应用技术国家地方联合工程实验室, 江苏 徐州 221008; 3. 中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221008; 4. 淮南职业技术学院 信息与电气工程系, 安徽 淮南 232001)

摘要:在分析煤矿井巷无线信号传播环境特点及多天线辐射特性的基础上,提出了融合巷道波导理论和自适应阵列天线相关技术的自适应多天线技术,介绍了煤矿井巷自适应多天线的基本组成和原理,并探讨了其需进一步研究的关键技术。煤矿井巷自适应多天线可根据信道传输特征有选择地控制导引波模的数量、类型和强度,从源头上改善井下无线通信覆盖状况,提高煤矿无线通信系统性能。

关键词:煤矿井巷; 矿井无线通信; 自适应多天线; 自适应阵列天线; 巷道波导理论; 波束成形
中图分类号:TD655 文献标志码:A 网络出版时间:2017-09-27 14:38
网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20170927.1438.010.html>

Theory and key technologies research on adaptive multi-antenna in coal mine tunnel

HUO Yu^{1,2,3}, ZHANG Yi³, XU Zhao³, GAO Min^{1,2,4}

(1. Internet of Things(Perception Mine) Research Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. The National and Local Joint Engineering Laboratory of Mine Internet Technology on Mine, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 3. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 4. Department of Information and Electronic Engineering, Huainan Vocational and Technical College, Huainan 232001, China)

Abstract: Characteristics of wireless communication environment and multi-antenna radiation in coal mine tunnel were analyzed. An adaptive multi-antenna technology was proposed on basis of tunnel waveguide theory and adaptive array antenna technology. Basic composition and principle of the adaptive multi-antenna in coal mine tunnel were introduced. Meanwhile, key technologies needed to be further studied were discussed. The adaptive multi-antenna in coal mine tunnel can selectively control number, type and intensity of guided wave modes according to channel characteristics, so as to improve underground status of wireless communication coverage from the source and performance of coal mine wireless communication system.

Key words: coal mine tunnel; mine wireless communication; adaptive multi-antenna; adaptive array antenna; tunnel waveguide theory; beam forming

收稿日期:2017-03-28;修回日期:2017-08-14;责任编辑:李明。

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK20160264)。

作者简介:霍羽(1983—),女,山西晋中人,助理研究员,博士,主要研究方向为煤矿井下电磁波传播与天线理论等, E-mail: yuhuo@cumt.edu.cn。

引用格式:霍羽,张毅,徐钊,等. 煤矿井巷自适应多天线理论与关键技术研究[J]. 工矿自动化,2017,43(10):48-52.

HUO Yu,ZHANG Yi,XU Zhao,et al. Theory and key technologies research on adaptive multi-antenna in coal mine tunnel[J]. Industry and Mine Automation,2017,43(10):48-52.

0 引言

为了实现高效生产、安全避险、灾害监测等,迫切需要融合移动语音、移动多媒体、移动目标跟踪、无线传感器网络等技术,在矿山建设与生产中应用物联网^[1-2]。然而,煤矿井下无线信号干扰密集、多径效应突出、传播损耗大、通信距离短,严重影响各种数据、语音和图像通信的质量,导致成熟的无线通信系统在煤矿井下性能恶化^[3-4]。克服干扰、抑制多径效应、增大覆盖范围、改善井下无线传播质量迫在眉睫。

天线用于发送和接收无线信号,是无线通信系统的基本部件。天线设计、选型得当,可从源头上解决信号覆盖和传输问题,提高无线通信系统性能^[5-7]。但是目前针对矿用天线的研究很少。

井巷结构狭长,若天线波束过窄,则距天线较近的场区难以得到充分覆盖;若波束过宽,则信号的多径效应难以得到有效抑制,远场区覆盖性能下降。此外,若遇到移动机车、采矿设备等大体积金属障碍物,巷道内信道传输特征将发生改变,无线覆盖性能可能因视距遮挡等因素而迅速下降。如果能够在井下根据用户所处位置,通过调整天线发送的波束来控制信号的多径分量,将电磁波能量有选择地集中于某些低损耗波模上,可大大改善井下无线通信覆盖状况。自适应阵列天线能够估计信道参数,确定用户方位,自适应形成波束,实现上行链路的信号分离和下行链路的选择性发送,在保证信号有效覆盖的基础上,提高载干比,降低相关干扰。已有的矿用天线研究成果发现,受煤矿井巷波导效应的影响,一般的自适应阵列天线原理和技术不能直接应用于井下^[7-10]。另外,煤矿的应用环境特殊,对阵列天线的规模、尺寸、材质等都有特殊要求^[11]。这对自适应阵列天线及其信号处理理论提出了挑战。

针对上述问题,本文讨论了井下多天线的辐射场分布特性,在此基础上提出了融合波导理论和自适应阵列天线技术的自适应多天线技术,给出了自适应多天线在煤矿井下应用的基本组成和波束控制原理,并讨论了需进一步研究的关键技术。

1 煤矿井巷传播环境特点

煤矿井巷深度大,电磁波传播环境复杂,具体表现为以下4个方面。

(1) 多径效应严重,覆盖范围小。井巷空间狭长多岔,在数十千米范围内纵横交错。巷道由岩石、煤层组成,电磁波被限制在内部传播,传播特性近似于巨型波导,多径效应突出,传播损耗大,通信距离短^[12-14]。这导致井下信源之间的相关性易受巷道尺寸、通信距离、天线类型、天线安装角度等因素的影响,复杂多变^[7,9-10]。

(2) 干扰源密集。在煤矿井巷中的一些重点监测区域,信号源分布密集,且强度相当,往往会互相干扰。信号难以被分离和识别。传统自适应阵列天线根据信源位置发射多个波束,各波束在传播过程中会因巷道壁的遮挡形成附加的多径干扰。

(3) 无线设备应用、安装条件苛刻。井巷环境对阵列天线的规模、阵列结构及阵元的类型、数目、间距等的限制比室内等一般环境苛刻得多。根据已有的研究结论,巷道内电磁波传播的最佳频段为500~1 500 MHz^[14-15],因此阵元尺寸、阵元间距的可选范围很小。巷道内温度、湿度、粉尘等因素对天线的材质、结构和安装条件要求较高。此外,还要考虑煤炭生产安全的因素,如天线设计需满足本安防爆要求,天线形状及其安装方式、位置和角度不能影响井下生产设备的正常运转等^[11]。

(4) 干扰噪声特殊。实际的煤矿井巷内存在大量金属支架、电力电缆、钢轨、矿车、超大功率电气设备等,是井下无线通信的主要干扰源。这些工业噪声非常复杂,与一般环境中的高斯噪声不同,主要表现为强冲击噪声,具有随机性,通常远大于信号强度。在这种信噪比极低的环境中,如果只采用传统定向天线实现简单接收,而不对接收到的各路径信号加以区分、处理,则无法很好地解决干扰、多径效应问题。

2 煤矿井巷多天线辐射特性

假设矩形巷道宽度为 w ,高度为 h 。在巷道内建立直角坐标系,原点位于巷道横截面的中心, x , y , z 轴分别沿巷道的宽度、高度、长度方向。巷道两侧壁和顶底两壁的电参数分别为 K_1, K_2 。假设发射端由 N 个天线单元组成,垂直极化,且天线单元的类型、结构、尺寸、取向等相同,电流复振幅均为 I_0 。设第 $i(i=1, 2, \dots, N)$ 个天线单元在巷道中的位置为 $(x_{0,i}, y_{0,i}, z_{0,i})$,沿巷道中 (m, n) (m, n 为导引波模的阶数, $m=0, 1, \dots, \lfloor 2w/\lambda \rfloor, n=0, 1, \dots, \lfloor 2h/\lambda \rfloor, \lambda$ 为电磁波波长)阶导引波模的辐射场为 E_{mn}^i 。考虑到巷道空间狭窄,一般采用小尺寸天线。

根据多波模理论,第 i 个天线单元辐射场的近似表达式为^[8]

$$E_{nm}^i \approx -\frac{BZ_{nm}}{2\sqrt{M}} \cos k_{xmn}x \cos k_{ymn}y \cos k_{xmn}x_{0,i} \times \cos k_{ymn}y_{0,i} \exp[-jk_{zmn}(z-z_{0,i})] \quad (1)$$

式中: B 为天线在巷道的激励强度, $B = \iiint_V \mathbf{I}_0 \cdot \mathbf{i}_x dV$, V 为天线的电体积, $\mathbf{i}_x$ 为沿 x 方向的单位矢量; Z_{nm} 为特征阻抗; M 为导引波模个数, $M = (2\omega/\lambda + 1)(2h/\lambda + 1) - 1$; $k_{xmn}, k_{ymn}, k_{zmn}$ 为 (m, n) 阶导引波模波矢分量, 满足色散条件。

由此可得第 i 个天线单元的辐射场分布规律^[8]:

$$f^i(m, n) = f_0^i(m, n) F_{\text{couple}}^i(m, n) \quad (2)$$

式中: $f^i(m, n)$ 为第 i 个天线单元在巷道中的方向函数; $f_0^i(m, n)$ 为第 i 个天线单元在巷道截面中心的方向函数; $F_{\text{couple}}^i(m, n)$ 为第 i 个天线单元与巷道中 (m, n) 阶导引波模的耦合参数。

$$f_0^i(m, n) = Z_{nm} \cos k_{xmn}x \cos k_{ymn}y \times \exp[-jk_{zmn}(z-z_{0,i})] \quad (3)$$

$$F_{\text{couple}}^i(m, n) = \cos k_{xmn}x_{0,i} \cos k_{ymn}y_{0,i} \quad (4)$$

$F_{\text{couple}}^i(m, n)$ 是关于天线位置的函数, 在很大程度上影响其方向图。由式(2)~式(4)可看出, 当第 i 个天线单元在巷道中心, 即位置为 $(0, 0, z_{0,i})$ 时, 其与各导引波模的耦合效果最好, 此时 $F_{\text{couple}}^i(m, n) = 1, f^i(m, n) = f_0^i(m, n)$ 。

根据式(1), N 个天线单元共同作用后的辐射场为

$$E_{nm} \approx \sum_{i=1}^N E_{nm}^i \approx -\sum_{i=1}^N \frac{BZ_{nm}}{2\sqrt{M}} \cos k_{xmn}x \cos k_{ymn}y \times \cos k_{xmn}x_{0,i} \cos k_{ymn}y_{0,i} \exp[-jk_{zmn}(z-z_{0,i})] \quad (5)$$

如果将第 1 个天线单元作为参考天线, 可将式(5)变形为

$$E_{nm} \approx -\sum_{i=1}^N \frac{BZ_{nm}}{2\sqrt{M}} \cos k_{xmn}x \cos k_{ymn}y \times \exp[-jk_{zmn}(z-z_{0,1})] \cos k_{xmn}x_{0,i} \times \cos k_{ymn}y_{0,i} \exp[-jk_{zmn}(z_{0,1}-z_{0,i})] \quad (6)$$

根据式(3)、式(4), 将式(6)进一步简化为

$$E_{nm} \approx \frac{-B}{2\sqrt{M}} f_0^1(m, n) F_{\text{coupleN}}(m, n) \quad (7)$$

式中 $F_{\text{coupleN}}(m, n)$ 为多天线与巷道导引波模的耦合参数(简称多天线耦合参数)。

$$F_{\text{coupleN}}(m, n) = \sum_{i=1}^N \cos k_{xmn}x_{0,i} \cos k_{ymn}y_{0,i} \times \exp[-jk_{zmn}(z_{0,1}-z_{0,i})] = \sum_{i=1}^N F_{\text{couple}}^i(m, n) \exp[-jk_{zmn}(z_{0,1}-z_{0,i})] \quad (8)$$

由式(7)可知, N 个天线单元组成的多天线在巷道中的方向函数为

$$f(m, n) = f_0^1(m, n) F_{\text{coupleN}}(m, n) \quad (9)$$

式(9)的物理表述: 巷道中多天线的方向函数等于参考天线在巷道中心的方向函数和多天线耦合参数的乘积。其中多天线耦合参数反映了各天线单元与各导引波模耦合的叠加, 是关于各天线单元位置的函数。该规律同样适用于井下阵列天线的方向函数。

3 煤矿井巷自适应多天线基本组成与原理

3.1 自适应多天线基本组成

一般的阵列天线波束成形规律中, 只考虑天线单元之间的相对位置, 不考虑环境的耦合因素。而根据巷道中多天线的辐射场分布规律, 井下环境的耦合作用非常重要, 不可忽略, 主要表现在多天线耦合参数 $F_{\text{coupleN}}(m, n)$ 中。因此, 各天线单元在三维巷道中的位置是改变多天线方向图的关键因素之一。此外, 天线位置对天线辐射效率也有重要影响^[8]。若考虑巷道的波导耦合作用, 可使井下的多天线波束成形与控制更加灵活有效。据此, 本文提出融合巷道波导理论和自适应阵列天线相关技术的自适应多天线技术。

煤矿井巷自适应多天线包括多天线、模数转换模块、波束形成网络和自适应信号处理器, 如图 1 所示。

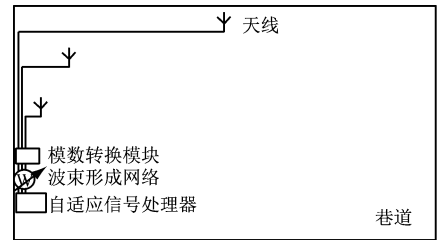


图1 煤矿井巷自适应多天线基本组成

Fig. 1 Basic composition of adaptive multi-antenna in coal mine tunnel

3.2 自适应多天线基本原理

(1) 多天线。巷道中的电磁波传播是多个导引波模叠加的结果。有的导引波模对传播起关键作用, 有的则因反射等因素迅速衰耗。为了有效利用

巷道波导耦合对多天线波束控制、波束成形的影响,首先需根据巷道中关键波模的数量设计多天线的单元数量,根据关键波模对应的天线耦合参数布置各天线单元的位置。

由于井下天线位置不同,天线方向图和效率也可能不同^[8],所以各天线单元的类型可能不同。为使天线单元效率最大化,还需根据巷道中的电磁波辐射功率角度分布特征,合理设计或选择天线单元的类型。

(2) 模数转换模块。在下行链路中将模拟信号转换成数字信号,在上行链路中将数字信号转换成模拟信号。

(3) 自适应信号处理器和波束形成网络。利用信道估计预测用户相对多天线系统的距离及障碍物的分布情况,根据信道特征自适应计算出各天线单元的最佳加权系数,以控制波束形成网络产生最佳覆盖波束。对距离多天线系统较近的用户,形成波瓣较宽、强度适中的波束,在保证位于巷道边缘区域的用户得到有效覆盖的前提下,避免近场区用户通信对远场区用户造成多径干扰;对距离多天线系统较远的用户,形成波瓣较窄的波束,减少多径干扰。

假设 t 时刻从 L 个方向发来的信号为 $\mathbf{S}(t) = [s_1(t) \ s_2(t) \ \cdots \ s_L(t)]^T$, $s_l(t)$ 为第 l ($l = 1, 2, \dots, L$) 个信号,来自 (m_l, n_l) 阶导引波模对应的射线方向, $\mathbf{N}(t)$ 为噪声矢量。假设多天线系统接收到的信号矢量为 $\mathbf{X}(t) = [\xi_1(t) \ \xi_2(t) \ \cdots \ \xi_N(t)]^T$, $\xi_i(t)$ 为第 i 个天线单元接收到的信号,则

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (10)$$

式中 $\mathbf{A}$ 为多天线系统的导向矩阵,由 L 个导向矢量构成。

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(m_1, n_1) \ \mathbf{a}(m_2, n_2) \ \cdots \ \mathbf{a}(m_L, n_L)] \quad (11)$$

式中 $\mathbf{a}(m_l, n_l)$ 为信号 $s_l(t)$ 在多天线系统中对应的导向矢量。

根据式(8)、式(9)得

$$\mathbf{a}(m_l, n_l) = \begin{bmatrix} F_{\text{couple}}^1(m_l, n_l) \\ F_{\text{couple}}^2(m_l, n_l) \exp[-jk_{zm_l n_l}(z_{0,1} - z_{0,2})] \\ \vdots \\ F_{\text{couple}}^N(m_l, n_l) \exp[-jk_{zm_l n_l}(z_{0,1} - z_{0,N})] \end{bmatrix} \quad (12)$$

假设多天线中第 i 个天线单元的复加权系数为 ω_i ,则多天线系统的复加权矢量为 $\mathbf{W} = [\omega_1 \ \omega_2 \ \cdots \ \omega_N]^T$ 。多天线系统的输出信号为

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{W}^H \mathbf{X}(t) \quad (13)$$

式中 $\mathbf{W}^H$ 为 $\mathbf{W}$ 的共轭转置。

4 煤矿井巷自适应多天线关键技术

(1) 煤矿井巷自适应多天线空时信道测量与建模。要预测煤矿井巷传播环境对自适应多天线的影 响,分析评估不同天线结构、算法和设计方案 的优劣,必须建立井巷内多天线空时信道模型。根据井巷内散射体分布状况,确定散射簇数量及其中起关键作用的多径分量,确定对数正态阴影衰落参数,给出计算角度功率谱和时延功率谱的数学公式,分析无线信道的空时相关性,以及天线阵列结构、安装位置、天线极化、天线与巷道内电磁场耦合对巷道传播特性的影响。

(2) 煤矿井巷自适应多天线结构设计。通常大规模阵列天线可带来高波束分辨率。但是受限空间的尺度限制了阵列天线的规模,在煤矿井巷尤为突出,应用于其中的多天线只能是较小规模的。为提高小规模阵列天线的波束分辨率,一般的自适应阵列天线技术常采用虚拟阵列变换算法来实现阵列天线的扩展。但是扩展后的虚拟阵元是否会和巷道内电磁场耦合,改变巷道的电磁波传播特性,进而影响 DOA(Direction of Arrival,来波方向)估计的准确性,还需考虑。因此需要研究空间几何尺寸小的多天线结构,通过合理选择天线单元类型和排列方式,获得尽可能多的天线单元。

多天线结构直接影响巷道传播特性、信道相干性,以及阵列流型和后期算法的复杂度、准确度。因此,确定适用于巷道传播环境且测向性能好的多天线排列方式,还需考虑多天线参数对信道相干性、DOA 估计算法的影响。

(3) 强干扰环境的弱信号分离和密集相干信源的解相干算法。煤矿井巷内干扰源众多,各种相干信源因空间位置集中而具有较大的强度,往往会淹没信号。接收端天线接收到的是多路信号的叠加,难以识别干扰和信号,无法估计波达方向。因此需要根据井巷内电磁波传播特性,研究巷道内干扰信号的特点,找出复杂受限空间中分离信号和干扰的有效办法。

受限空间内相干信源组簇较少,簇内相干信源密集,信源数大于阵元数,导致信号解相干困难。一般的解相干算法不考虑信号相干系数,但受限空间中信源相干系数受接收位置、空间尺寸等影响,复杂多变^[9],需要研究受限空间相干信源密集、信源相干

结构复杂情况下的解相干算法。

(4) 抗强冲击噪声干扰的信道参数估计算法。井下不仅有地杂波噪声,还有各种大功率电气设备产生的大量工业噪声。这些随机噪声通常具有很强的冲击性,统计特性与一般的高斯分布差别很大,并且随频率不同,其分布规律不同。需要研究能抵御强冲击噪声干扰的信道参数估计算法,以适应冲击噪声繁杂、相干信号众多的复杂受限空间环境。

5 结论

(1) 融合了巷道波导理论和自适应阵列天线相关技术的自适应多天线技术,可以根据巷道中用户所处位置及采矿设备等障碍物分布情况,自适应控制波束,将电磁波能量有选择地集中于某些低损耗波模上,控制多径的数量和方向,从源头上改善井下无线通信覆盖状况,提高无线通信系统性能。

(2) 自适应多天线技术从空域技术角度解决了现有矿井无线通信的瓶颈问题,同时适用于其他阵列天线技术,如 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output, 多输入多输出)、相控阵等在煤矿井巷或地铁、公路隧道等类似受限空间的研究与应用。

参考文献 (References):

- [1] 丁恩杰,赵志凯. 煤矿物联网研究现状及发展趋势[J]. 工矿自动化, 2015, 41(4): 1-5.
DING Enjie, ZHAO Zhikai. Research advances and prospects of mine Internet of things[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(5): 1-5.
- [2] 吴立新,汪云甲,丁恩杰,等. 三论数字矿山——借力物联网保障矿山安全与智能采矿[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 357-365.
WU Lixin, WANG Yunjia, DING Enjie, et al. Thirdly study on digital mine: serve for mine safety and intellimine with support from IoT[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 357-365.
- [3] 胡青松,张申,吴立新,等. 矿井动目标定位:挑战、现状与趋势[J]. 煤炭学报, 2016, 41(5): 1059-1068.
HU Qingsong, ZHANG Shen, WU Lixin, et al. Localization techniques of mobile objects in coal mines: challenges, solutions and trends[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(5): 1059-1068.
- [4] FOROOSHANI A E, BASHIR S, MICHELSON D G, et al. A survey of wireless communications and propagation modeling in underground mines[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(4): 1524-1545.

- [5] BASHIR S. Effect of antenna position and propagation on UWB propagation channel in underground mines and tunnels [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(9): 4771-4779.
- [6] RISSAFI Y, TALBI L, GHADDAR M. Experimental characterization of an UWB propagation channel in underground mines [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(1): 240-246.
- [7] SUN Z, AKYILDIZ I F. Optimal MIMO antenna geometry analysis for wireless networks in underground tunnels [C]//IEEE Global Telecommunications Conference, Honolulu, 2009: 1-6.
- [8] 霍羽,刘逢雪,徐钊. 煤矿井巷天线位置对辐射场分布的影响[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4): 715-720.
HUO Yu, LIU Fengxue, XU Zhao. Effect of antenna location on radiation field distribution in coal mine tunnels[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4): 715-720.
- [9] MOLINA-GARCIA-PARDO J, LIENARD M, DEGAUQUE P, et al. Interpretation of MIMO channel characteristics in rectangular tunnels from modal theory[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(3): 1974-1979.
- [10] 郑红党,徐钊,聂小燕,等. 煤矿井下 MIMO 信道模型的研究[J]. 工矿自动化, 2009, 35(8): 45-49.
ZHENG Hongdang, XU Zhao, NIE Xiaoyan, et al. Research of MIMO channels model in coal mine underground[J]. Industry and Mine Automation, 2009, 35(8): 45-49.
- [11] LIU W D, ZHANG Z J, TIAN Z J, et al. A bidirectional high-gain cascaded ring antenna for communication in coal mine[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013, 12: 761-764.
- [12] ZHOU C M, PLASS T, JACKSHA R, et al. RF propagation in mines and tunnels: extensive measurements for vertically, horizontally, and cross-polarized signals in mines and tunnels [J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2015, 57(4): 88-102.
- [13] 霍羽,徐钊,刘逢雪. 融合波模和射线理论的矿井电波传播模型[J]. 电子学报, 2013, 41(1): 110-116.
HUO Yu, XU Zhao, LIU Fengxue. A wave propagation model combined the modal theory and ray theory in coal mine tunnels[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(1): 110-116.
- [14] 霍羽,徐钊,郑红党. 矩形隧道中的多波模传播特性[J]. 电波科学学报, 2010, 25(6): 1225-1230.

HUO Yu, XU Zhao, ZHENG Hongdang.
Characteristics of multimode propagation in
rectangular tunnels [J]. Chinese Journal of Radio
Science, 2010, 25(6): 1225-1230.

[15] 张冰丽, 成凌飞, 高慧, 等. 粗糙度对矩形巷道电磁波
传播特性影响的仿真[J]. 计算机仿真, 2016, 33(2):
216-220.

ZHANG Bingli, CHENG Lingfei, GAO Hui, et al.
Simulation of influence of wall roughness on
electromagnetic wave propagation characteristics in
rectangular tunnel [J]. Computer Simulation, 2016,
33(2): 216-220.