500 kV电缆隧道Wi-Fi无线通信方案探讨

介绍了MESH网络的概念及无线通信的特点，通过现场测试数据及其应用表明，电力隧道内覆盖Wi-Fi无线信号，信号稳定可靠，数据传输量大，可以实现隧道内的应急通信、视频传输、GPS定位和设备终端数据上传等重要功能，根据500 kV盾构电力隧道结构特点，对十字分割舱体内无线Wi-Fi信号传输特性进行测试，提出Wi-Fi无线通信系统并组建可行方案。

张 成 陈 明 赵 洋 高智益 刘 青/国网北京市电力公司

张 成/工程师

关键词/Keywords
电缆·
盾构隧道·
MESH网络·
无线通信·
泄漏电缆·

北京地区四通八达的地下电力隧道是北京电网的重要设施，也是重要的电力电缆线路及通信线缆的路径资源，在北京电网中发挥着及其重要的作用。截止到2015年3月，北京地区的电力电缆隧道里程超过720 km。

常见的隧道通信方式为有线通信和无线对讲机。有线通信设备都固定在隧道内，不符合隧道内的移动通信需求；而无线对讲机的方式信号受限于隧道封闭结构，有效传输距离较短（通常小于50 m），不能满足日常生产工作需要。结合近期投运的敷设500 kV电缆[1]的盾构隧道结构特点[2]，进行无线通信系统建设方案的研究，无线通信系统建立后可以实现隧道内的应急通信、视频传输、GPS定位、终端设备数据上传和机器人巡检等重要功能[3]，并能够有效节省隧道空间和通信线缆资源。

Wi-Fi无线通信系统

1. 电力隧道内覆盖Wi-Fi无线通信的优点

无线通信与有线通信相比扩展性能更好。使用有线通信时，增加新的终端设备需要重新布线，而无线通信只需将原终端设备的内容克隆到新增设备，就可以实现设备的扩充。就终端设备而言，有线通信的终端设备是固定无法移动的，无线终端设备都是便携式的，可以随身携带，随处通信。

2. MESH网络应用

MESH网络（无线网状网）是一种基于多跳路由、对等网络技术的新型网络结构[4]，它由Ad－Hoc网络发展变化而来，承袭了Ad－Hoc网络动态扩展、自组网、自配置、自管理和自愈合等优良特性，是移动Ad－Hoc网络的一种特殊形态，是一种新型的宽带无线网络结构，具有移动宽带的特性。可以被看成是WLAN和Ad－Hoc网络的融合，并兼具两者的优势。MESH技术将传统WLAN中的无线“热点”扩展为真正大面积覆盖的无线“热区”，可以使WLAN的安装部署、网络扩容更加方便。

MESH网络架构可以扩展通信传输区域，也可以同时为无线用户和网络节点提供接入服务。图1展示了Wi-Fi MESH网络的基本思想，无线MESH网络配备多条冗余路由。一旦其中一条链路中断，

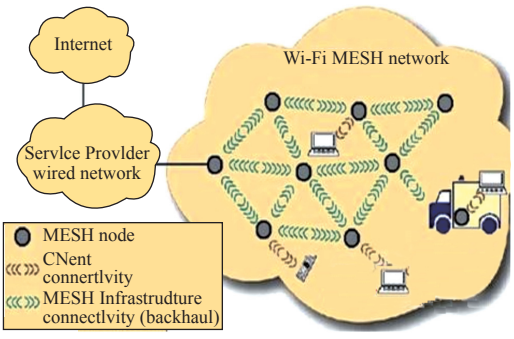

图1 基本Wi-Fi MESH网络

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

数据包可自动重新寻路继续传输，不会影响整个网络的运行。从而避免出现单跳网络中一个节点出现故障，造成大范围服务中断的问题。

无线MESH网络与传统无线网络相比具有传输速率高、覆盖范围大、可靠性高、网络配置和维护简便快捷、投资成本低等优点。

电力隧道Wi-Fi无线通信组网方式研究

1. 无线MESH与圆锅背射天线组网

测试所在电力隧道段断面尺寸为2.3 m×2.6 m，长度为300 m，直线且内部无较大坡度起伏。无线MESH与圆锅背射天线组网方式。利用背射天线在隧道中布满信号，测试人员通过往返移动的方式模拟现实情况，测试信号强度、信号传输特性等数据。表1为固定位置采集的测试信号数据，图2为140 m处人员移动所测得的信号带宽及信号特性。

表1　利用背射天线传输信号特性

编号	MESH距离 /m	本地接收强度 /dBm	远程接收强度 /dBm	链路带宽 /(Mbit/s)
1	120	−76	−73	20
2	140	−77	−75	0.012
3	160	−83	−83	4
4	170	−84	−83	4
5	180	–	–	–

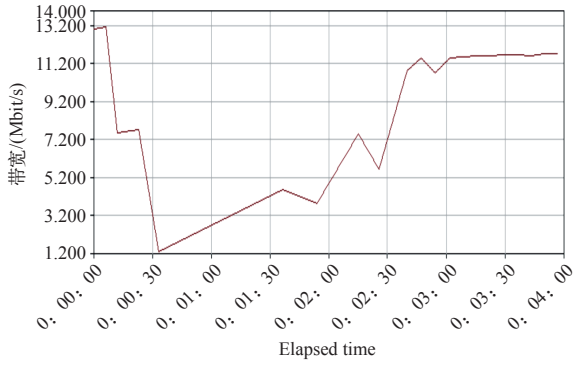

图2　140 m处人员移动时信号带宽及信号特性

可以看出，利用背射天线在直线隧道中传输信号，最远传输距离为170 m。人员走动会严重影响信号的稳定程度。

电力隧道内除电磁场对信号具有一定的干扰外，电缆支架网对信号的传输具有更大的影响。工作人员在已覆盖Wi-Fi无线信号的区域内走动，会遮挡信号传播路径，造成信号强度大幅衰减。

2. 无线MESH与板状天线组网

测试环境不变，采用无线MESH与板状天线组网方式。板状天线所发射出的信号相比圆锅背射天线更加聚拢，因此被电缆支架网所吸收的发射信号相对较少。表2为无线MESH与板状天线组网方式采集的测试信号数据。

表2　利用板状天线传输信号特性

编号	MESH距离 /m	本地接收强度 /dBm	远程接收强度 /dBm	链路带宽 /(Mbit/s)
1	180	−76	−74	20
2	200	−78	−80	10
3	250	−82	−83	7
4	260	−85	−84	4
5	280	−87	−88	2
6	300	−88	−89	2

图3、图4分别为180 m处、250 m处人员走动时的信号带宽及信号特性。

满足128 Kbit/s即可实现至少两路的少抖动的语音通信，利用无线MESH与板状天线的组网方

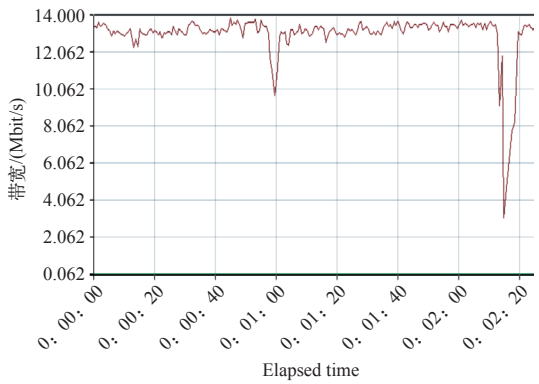

图3　180 m处人员移动时的信号带宽及信号特性

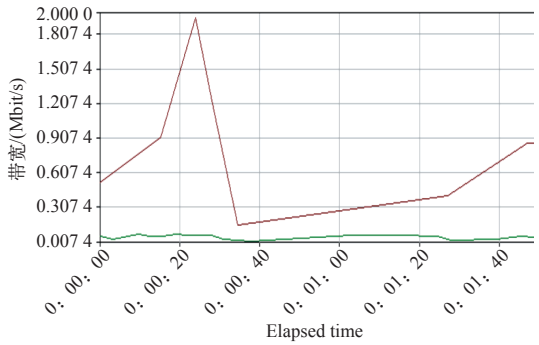

图4　250 m处人员走动时的信号带宽及信号特性

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式，距离300 m时链路带宽能够达到2 Mbit/s，工作人员在隧道内走动的情况下，虽然信号强度有较大的衰减，但依旧可以满足两路的少抖动的语音通信。

从无线MESH与板状天线组网方式的测试结果可以看出，MESH的信号特性以及板状天线对信号传输的控制效果较好。

3. 无线MESH与泄漏同轴电缆组网方式

现实中，大量电力隧道并不符合直线长度达到300 m且没有较大坡度起伏的特点，通常每隔100 m就会出现分叉路段或者一定起伏、斜坡路段，在不理想甚至恶劣的路段下，可能每隔30 m就会伴随出现多分叉口和连续起伏路面或者大拐弯，这样的起伏和拐弯会严重影响信号传输，若无线信号正常传输，需在起伏点或拐点加增MESH设备跳接。

泄漏同轴电缆[5]（Leaky Coaxial Cable）通常又简称为泄漏电缆或漏泄电缆，其结构与普通的同轴电缆基本一致，由内导体、绝缘介质和开有周期性槽孔的外导体3部分组成。电磁波在泄漏电缆中纵向传输的同时通过槽孔向外界辐射电磁波；外界的电磁场也可通过槽孔感应到泄漏电缆内部并传送到接收端[6]。泄漏电缆集信号传输、发射与接收等功能于一体，同时具有同轴电缆和天线的双重作用，特别适用于覆盖公路、隧道和城市地铁等无线信号传播受限的区域。

4. Wi-Fi无线通信组网方式优缺点比较

通过无线MESH与背射天线、板状天线及泄漏同轴电缆组网的3种方式比较可以看到：直线且内部无较大坡度起伏的电力隧道中，采用板状天线组网较背射天线信号更强，传输距离更远，较泄漏电缆天线建设成本更经济；在分支、转弯和断面变化等复杂的电力隧道结构条件下，采用泄漏电缆天线发射Wi-Fi信号能减少发射基站的建设投资，经济性更强。

500 kV盾构电力隧道内无线通信现场情况

1. 500 kV盾构电力隧道结构

目前北京地区首条敷设的500 kV电力电缆的隧道结构为盾构，断面内径为5.4 m，并使用钢筋混凝土结构十字隔板将隧道分为4个电缆舱体，双回500 kV电缆分别位于下部双舱体，上部双舱体敷设220 kV电缆，如图5所示。

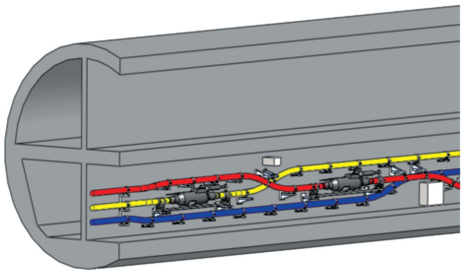

图5 500 kV盾构电力隧道

2. 隧道内Wi-Fi无线通信系统需求

500 kV电力隧道搭建Wi-Fi平台与隧道内Wi-Fi信号覆盖建设，集成了手机Wi-Fi接入、网络电话接入、电话跨网转接和电力隧道智能巡检机器人巡视系统数据传输业务等。

隧道上部两个220 kV电缆舱的Wi-Fi信号覆盖系统仅用于手机Wi-Fi信号接入；隧道下部两个500 kV隧道舱的Wi-Fi信号覆盖系统用于手机Wi-Fi信号接入及智能巡检机器人巡视系统数据传输业务。

3. 隧道内信号强度测试

将隧道的4个电缆舱体分为4个象限，并进行编号，如图6所示。

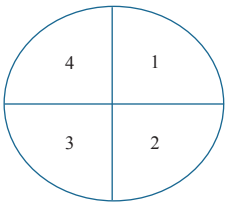

图6 十字分割隧道象限分布

（1）Wi-Fi信号穿透能力测试

使用板状天线定向接收Wi-Fi信号，对穿透十字隔板的信号衰减情况进行测试，测试数据如表3所示。

（2）Wi-Fi信号传输距离测试

发射器放置在1象限，在0～600 m的距离内，对1象限、2象限进行Wi-Fi信号检测，测试数据如表4所示。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表3　电力隧道Wi-Fi信号穿透测试数据表

发射器象限	接收器象限	信号强度/dB	衰减情况/dB
1象限	1	－33	0
	2	－52	19
	4	－61	28
	3	－91	58
4象限	4	－34	0
	1	－58	24
	3	－68	34
	2	－91	57

表4　板状天线测试数据表

离发射器距离/m	接收器在1象限信号/dB	接收器在2象限信号/dB
100	–	50/51/52/53
150	49/51/52	–
200	54/56/57	53/57/69/71
250	57/63/65	–
300	58/59/60	82/84/85
350	58/64/67	–
400	51	78/83
450	59/65/70	无信号
500	60/67/68	无信号
550	68/67/62	无信号
600	59/69/75/68	无信号

结束语

经过无线通信组网方式对比研究及隧道内Wi-Fi信号测试，进行数据分析得出如下结论。

1）直线且内部无较大坡度起伏的电力隧道中，采用板状天线组网传输距离可以达到300 m以上，但距离越远信号强度越弱。

2）在电力隧道结构复杂的情况下，采用泄漏电缆辐射Wi-Fi信号能使线路全长信号分布均匀，减少发射基站的数量。

3）受电力隧道结构和支架接地网影响，人员在隧道内移动时Wi-Fi信号强度会产生一定衰弱。

4）500 kV盾构电力隧道的十字分割舱体均为钢筋混凝土结构，相邻两个格挡信号衰减平均为20～30 dB，交叉象限信号平均衰减50～60 dB。

5）考虑数据传输需求的不同，为满足500 kV盾构电力隧道上部两个电缆舱手机Wi-Fi信号接入，下部两个电缆舱手机Wi-Fi信号接入及智能巡检机器人巡视系统数据传输业务，应在上部两个舱体内使用板状天线，在下部两个舱体使用泄漏电缆进行Wi-Fi无线通信。

6）电力隧道内覆盖的Wi-Fi无线信号，信号稳定可靠，数据传输量大，可以实现隧道内的应急通信、视频传输、GPS定位和终端设备数据上传等重要功能，符合电力隧道通信需求，并能满足未来在线监测功能扩展需求。

参考文献

[1] 王恩德，仇天骄，朱占巍，等．500 kV电缆送电工程技术研究与应用 [J]．中国电业：技术版，2014 (5)：29-34．

[2] 杨文威，李峻，胡松军．新型盾构法施工技术在电缆隧道建设中的应用前景 [J]．特种结构，2009，26 (6)：31-35．

[3] 刘毓江，柴跃林．公路隧道无线通信信号覆盖的新探索 [J]．科技创新导报，2007 (35)：26-27．

[4] 秦裕斌，陈建华，黄晓．无线Mesh网络技术及其应用 [J]．通信技术，2009，42 (12)：144-146．

[5] 赵瑞静，蓝燕锐．漏缆在自由空间和隧道中性能的对比分析 [C]．2011年光缆电缆学术年会论文集，2011：414-417．

[6] 冯琳琳，杨晓冬，王琢．泄漏同轴电缆在隧道中的辐射特性研究 [J]．传感器与微系统，2011，30 (4)：76-79．

（收稿日期：2015－04－15）EA

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net