

# 低成本地铁隧道5G覆盖方案研究

## Research on Low-Cost 5G Coverage Scheme of Subway Tunnel

何明<sup>1</sup>,彭涛<sup>2</sup>,梁师铭<sup>3</sup>(1. 中国联通广东分公司,广东广州510630;2. 中国联通广州分公司,广东广州510627;3. 中国联通深圳分公司,广东深圳518048)

He Ming<sup>1</sup>,Peng Dao<sup>2</sup>,Liang Shiming<sup>3</sup>(1. China Unicom Guangdong Branch,Guangzhou 510630,China;2. China Unicom Guangzhou Branch,Guangzhou 510627,China;3. China Unicom Shenzhen Branch,Shenzhen 518048,China)

### 摘要:

地铁是大城市主要公共交通工具之一,5G覆盖需求迫切。提出一种优化频段组合的泄漏电缆覆盖方案,在保证网络覆盖的基础上,不但可大幅降低3家运营商5G信号接入带来的互调干扰,而且可显著降低建设成本;此外提出一种泄漏电缆斜射覆盖的方案,可实现已运营地铁隧道的5G覆盖。2种方案均在广东地铁得到应用,效果良好。

### 关键词:

5G覆盖;地铁隧道;低成本;互调干扰;斜射覆盖  
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2022.02.013  
文章编号:1007-3043(2022)02-0071-06  
中图分类号:TN929.5  
文献标识码:A  
开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Abstract:

Subway is one of the major public transportations in big cities, and 5G coverage is in urgent demand. An optimized leakage cable coverage scheme is proposed. On the basis of acceptable network coverage, this scheme can not only significantly reduce the intermodulation interference caused by 5G signal of three operators, but also effectively reduce the construction cost. In addition, it proposes a leakage cable oblique incidence coverage scheme, which can meet the need of 5G coverage of the subway tunnel in operation. Both schemes have been applied in Guangdong subway with good results.

### Keywords:

5G coverage; Subway tunnel; Low-cost; Intermodulation interference; Oblique incidence coverage

**引用格式:**何明,彭涛,梁师铭. 低成本地铁隧道5G覆盖方案研究[J]. 邮电设计技术,2022(2): 71-76.

## 1 概述

地铁是大城市的主要交通工具之一,人流密度大,是5G部署的首发室内场景之一,截至2019年底,广东地铁运营总里程已超过800 km,日均客运量超1500万人次,快速高效实现地铁5G覆盖可以显著提升用户感知。

业内对如何实现地铁5G覆盖进行了深入的研究,地铁5G覆盖的难点在于隧道覆盖。地铁隧道空间狭窄、存在一定弧度的弯道,当列车经过时隧道内剩余

空间较小,对信号传播有较大影响。尽管公路隧道或高铁隧道中可考虑八木天线等特型天线覆盖方案<sup>[1-2]</sup>,但由于安装空间和天线尺寸受限,且地铁运营方出于安全角度考虑,地铁隧道覆盖方案大多采用泄漏电缆<sup>[3]</sup>。各运营商不同制式的系统合路时,尤其是当中国移动2.6 GHz与中国电信和中国联通3.5 GHz的5G频段接入后,互调分量会对现有系统的上行造成较大干扰,文献[4]对3家合路的干扰进行量化说明和隔离研究。重庆联通在轨道环线二期新建线路隧道采用5/4"泄漏电缆的覆盖方案实现多运营商接入,通过POI严格选型等措施控制互调干扰,最终设备间距设置为400 m<sup>[5]</sup>。浙江联通对比了不同型号的5/4"泄漏电缆

收稿日期:2021-11-23

的特性,并分析了3家2缆、中国电信和中国联通2缆、中国电信和中国联通5G 2缆和3家5G 2缆4种方案的优劣,设置验证场景进行试点论证<sup>[6]</sup>。山东移动在济南R3线隧道采用2条13/8"泄漏电缆单独实现全网覆盖的方式,实现了636 m的设备间距<sup>[7]</sup>。

已运行地铁的隧道内壁正对车窗的位置基本占满,没有预留位置给5G网络部署新增泄漏电缆,现有研究成果中如何实现已运营地铁隧道的5G覆盖的研究较少<sup>[8-9]</sup>。此外,现有研究中更多是研究如何实现地铁5G覆盖<sup>[10-15]</sup>,对不影响用户感知的情况下如何低成本实现5G覆盖考虑较少。本文结合广东联通的5G地铁部署,研究上述2个问题的解决方案。

## 2 低成本地铁隧道5G覆盖方案

### 2.1 泄漏电缆选型分析

目前业内有5/4"全频段漏缆、5/4"高性能中高频

漏缆和5/4"专用5G漏缆。其中5/4"全频段漏缆支持800~3 600 MHz频段,漏缆整体综合考虑各频段,性能平均,3.5 GHz频段综合损耗较大;5/4"高性能中高频漏缆支持1 700~3 600 MHz频段,可支持中频和5G频段接入,3.5 GHz频段综合损耗明显改善;5/4"专用5G漏缆支持2 600~3 700 MHz频段,不支持2G/3G/4G的中低频段,但3.5 GHz频段综合损耗最小。

以某厂家提供的5/4"高性能中高频漏缆为例,电气性能如表1所示。

在地铁隧道中不同制式允许的最大综合损耗如式(1)所示,设备间距设置如式(2)所示:

$$\text{最大综合损耗} = \text{漏缆入口功率} - \text{宽度因子} - \text{车体阻挡} - \text{人体损耗} - \text{工程余量} \quad (1)$$

$$\text{设备间距} = 2 \times (\text{设备最大综合损耗对应距离} - \text{切换距离余量}) \quad (2)$$

对于5/4"全频段漏缆和5/4"高性能中高频漏缆,

表1 5/4"高性能中高频漏缆电气性能(单位: dB,公差: ±3dB)

频率/MHz	150 m综合损耗	200 m综合损耗	250 m综合损耗	300 m综合损耗	350 m综合损耗	400 m综合损耗	450 m综合损耗	500 m综合损耗
1 800	78	80	82	84	87	90	94	98
2 100	77	79	81	84	87	90	94	98
2 300	77	80	83	85	88	91	95	100
2 600	78	81	84	87	91	95	101	106
3 300	76	78	82	85	90	94	100	106
3 400	76	79	83	87	91	96	102	109
3 500	78	81	84	87	91	96	102	109
3 600	78	81	84	88	93	98	106	114

中国电信和中国联通5G设备对应的设备间距对比表如表2所示。

从表2可以看出,以覆盖边缘场强-105 dBm为覆盖标准,漏缆入口功率为9.38 dBm,那么泄漏电缆允许的最大综合损耗为92.38 dB。考虑切换距离,如果使用5/4"高性能中高频漏缆,5G设备理论间距可设置为646 m;如果使用5/4"全频段漏缆,5G设备理论间距只可设置为406 m。

### 2.2 隧道接入系统频段分析

对于新建地铁隧道,各运营商共提出15个系统需求,为便于后续互调干扰分析,将每个系统增加备注频段,如表3所示。

### 2.3 互调干扰分析

当多个系统合路到同一条泄漏电缆中时,由于传输信道中的非线性,2个或多个信号会产生很多谐波和互调频率分量,如果这些互调分量落入使用系统的

上行频段,就会造成互调干扰。通过对上述8个频段互调分量进行计算分析,各个频段产生的2阶、3阶互调分量对中国联通中高频系统上行频段造成的干扰共有26种组合,具体如表4所示。

通过分析可以发现,如果泄漏电缆不引入频段1和频段2的信号,即如果不引入中国电信CDMA800和中国移动、中国联通GSM900信号,对中国联通和中国电信中高频上行频段造成干扰的分量就大幅下降为12种组合,且5G频段不再受到互调干扰分量影响。优化后的互调干扰分析如表5所示。

按照经验三阶互调干扰小于-107 dBm,如果系统互调抑制制度可以保证-155 dBc@46 dBm或-150 dBc@43 dBm,互调干扰将不会影响系统性能。如果系统只引入频段8中国移动2.6 GHz和频段9中国电信和中国联通3.5 GHz,则不会产生影响自身系统的互调分量。

表2 2类泄漏电缆的设备间距测算表

类别	计算	全频段 5/4"漏缆	中高频5/ 4"漏缆
RS功率/dBm	$d$	13.88	13.88
POI插入损耗/dB	$e$	3	3
接头及跳线损耗/dB	$g$	1.5	1.5
连接电缆损耗/dB	$h$	0	0
漏缆入口功率/dBm	$i=d-e-g-h$	9.38	9.38
4 m处衰减因子(宽度因子)	$l$	5	3
车体阻挡/dB	$m$	13	13
人体损耗/dB	$n$	3	3
工程余量/dB	$o$	3	3
覆盖边缘场强/dBm	$p$	-105	-105
允许的最大综合损耗/dB	$q=i-l-m-n-o-p$	92.38	92.38
300 m综合损耗/dB	$r_2$	103.50	88.00
350 m综合损耗/dB	$r_3$	109.75	93.00
300 m区间近似每米损耗/dB	$r_4$	0.12	0.10
切换时延/s	$s$	1	1
车速/(km/h)	$t$	80	80
切换距离/m	$u=s \times t$	22	22
单边覆盖距离/m	$v$	225	343
考虑切换单边覆盖距离/m	$w=v-u$	203	323

表3 各运营商地铁隧道网络需求

运营商	系统	上行频段/ MHz	下行频段/ MHz	备注
中国电信	中国电信CDMA800	825~835	870~880	频段1
	中国电信LTE FDD1.8G	1 765~1 785	1 860~1 880	频段3
	中国电信LTE FDD2.1G	1 920~1 940	2 110~2 130	频段6
	中国电信5G	3 400~3 500	3 400~3 500	频段9
中国移动	中国移动GSM900	885~909	930~954	频段2
	中国移动DCS1800	1 710~1 735	1 805~1 830	频段3
	中国移动TD-LTE(F)	1 885~1 915	1 885~1 915	频段4
	中国移动TD-LTE(A)	2 010~2 025	2 010~2 025	频段5
	中国移动TD-LTE(E)	2 320~2 370	2 320~2 370	频段7
中国移动5G	2 515~2 675	2 515~2 675	频段8	
中国联通	中国联通GSM900	909~915	954~960	频段2
	中国联通LTE FDD1.8G	1 735~1 765	1 830~1 860	频段3
	中国联通WCDMA	1 940~1 965	2 130~2 155	频段6
	中国联通TD-LTE(E)(预留)	2 300~2 320	2 300~2 320	频段7
	中国联通5G	3 500~3 600	3 500~3 600	频段9

## 2.4 低成本隧道覆盖方案分析

在当前共建共享的基础上,基于2T2R主要有3种解决方案。

方案1:3家2G/3G/4G和中国移动5G接入13/8"低频漏缆,中国联通和中国电信5G接入5/4"高频漏缆。

表4 互调干扰分析表

序号	阶数	干扰频段号1	干扰频段号2	干扰频段号3	被干扰频段号	各干扰信号的阶次	符号
1	2	频段4	频段9	-	频段3	1、1、	--
2	2	频段3	频段9	-	频段3	1、1、	--
3	2	频段2	频段8	-	频段3	1、1、	--
4	3	频段8	频段9	-	频段3	2、1、	+-
5	3	频段6	频段7	频段8	频段3	1、1、1、	+++
6	3	频段6	频段8	-	频段3	2、1、	+-
7	3	频段5	频段7	频段8	频段3	1、1、1、	+++
8	3	频段4	频段7	频段8	频段3	1、1、1、	+++
9	3	频段3	频段7	频段8	频段3	1、1、1、	+++
10	3	频段2	频段8	频段9	频段3	1、1、1、	+++
11	3	频段2	频段4	频段8	频段3	1、1、1、	+++
12	3	频段2	频段3	频段8	频段3	1、1、1、	+++
13	3	频段1	频段8	频段9	频段3	1、1、1、	+++
14	3	频段1	频段3	频段8	频段3	1、1、1、	+++
15	3	频段1	频段2	频段9	频段3	1、1、1、	--+
16	3	频段1	频段9	-	频段3	2、1、	--
17	3	频段8	频段9	-	频段6	2、1、	+-
18	3	频段7	频段8	-	频段6	2、1、	+-
19	3	频段6	频段7	频段8	频段6	1、1、1、	+++
20	3	频段3	频段7	频段8	频段6	1、1、1、	+++
21	3	频段2	频段8	频段9	频段6	1、1、1、	+++
22	3	频段2	频段7	频段9	频段6	1、1、1、	+++
23	3	频段1	频段8	频段9	频段6	1、1、1、	+++
24	3	频段1	频段7	频段9	频段6	1、1、1、	+++
25	3	频段1	频段6	-	频段9	1、2、	--
26	3	频段1	频段3	-	频段9	2、1、	++

表5 优化后互调干扰分析表

序号	阶数	干扰频段号1	干扰频段号2	干扰频段号3	被干扰频段号	各干扰信号的阶次	符号
1	2	频段4	频段9	-	频段3	1、1、	--
2	2	频段3	频段9	-	频段3	1、1、	--
4	3	频段8	频段9	-	频段3	2、1、	+-
5	3	频段6	频段7	频段8	频段3	1、1、1、	+++
6	3	频段6	频段8	-	频段3	2、1、	+-
7	3	频段5	频段7	频段8	频段3	1、1、1、	+++
8	3	频段4	频段7	频段8	频段3	1、1、1、	+++
9	3	频段3	频段7	频段8	频段3	1、1、1、	+++
17	3	频段8	频段9	-	频段6	2、1、	+-
18	3	频段7	频段8	-	频段6	2、1、	+-
19	3	频段6	频段7	频段8	频段6	1、1、1、	+++
20	3	频段3	频段7	频段8	频段6	1、1、1、	+++

方案2:3家2G/3G/4G接入13/8"低频漏缆,3家5G接入5/4"高频漏缆。

方案3:安装位置受限,3家均接入5/4"全频漏缆。

在方案1中,中国联通和中国电信要分摊2条5/4"高频漏缆成本,中国联通和中国电信难以接受;方案2中国移动要比方案1多分摊2条5/4"高频漏缆,且在2.6 GHz上5/4"漏缆性能低于13/8"低频漏缆,中国移动为满足覆盖还需额外新增5G设备,中国移动难以接受。方案3存在较大干扰;且因3.5 GHz频段覆盖能力受限,设备断点设置较密,建设成本高。

本文提出一种优化接入信号频段组合的漏缆方案:3家只引入1 700 MHz~3.6 GHz的信号,使用5/4"高性能中高频漏缆。该方案有以下优点。

a) 由于不引入频段1和频段2可以大幅降低干扰互调分量(根据2.3节分析),可以保证4G/5G网络质量。

b) 5/4"高性能中高频漏缆在3.5 GHz频段性能要明显优于5/4"全频段漏缆,综合损耗小可以提高设备

设计间距,减少覆盖隧道的设备数量,从而降低建设成本。

c) 3家运营商总共只使用2条漏缆,分布系统的建设成本大幅下降,若中国铁塔承建而支付租金也会明显低于上述4条漏缆方案的方案1和方案2。

d) 从地铁的业务模型来看,隧道场景业务量低,放弃低频段也不会对用户感知造成影响。

因此推荐该方案为新建地铁线路隧道覆盖方案,采用该方案建设的地铁隧道设备间距测试如表6所示。

从表6可以看出,各频段受限于中国移动NR2.6 GHz,如果部署2条漏缆3家接入,断点设置应以中国移动NR2.6 GHz覆盖能力为标准,即单边覆盖距离为289.31 m,理论测算隧道RRU间距为570 m左右。

以此方案进行建设成本对比,由于设备间距是5/4"全频段漏缆的1.4倍,以5G全线覆盖的深圳地铁10

表6 低成本泄漏电缆接入方案对比表

类别	计算	中国移动 DCS1800	中国电信和 中国联通 FDD-LTE	中国移动 TDD-LTE	中国移动 TDD- LTE2.0 GHz	中国电信和 中国联通 FDD- LTE2.1 GHz	中国移动 TDD- LTE2.3 GHz	中国移动 TDD-LTE- 2.6 GHz	中国电信和 中国联通 3.5 GHz
上行频段/MHz		1 710~1 735	1 735~1 785	1 885~1 915	2 010~2 025	1 920~1 975	2 320~2 370	2 515~2 675	3 400~3 600
下行频段/MHz		1 805~1 830	1 830~1 880	1 885~1 915	2 010~2 025	2 110~2 155	2 320~2 370	2 515~2 675	3 400~3 600
导频功率、载波功率及RS功率/ dBm	$d$	36	12.2	12.2	12.2	15.2	12.2	12.2	13.88
POI插入损耗/dB	$e$	5	5	5	5	5	5	5	3
接头及跳线损耗/dB	$g$	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
连接电缆损耗/dB	$h$	0	0	0	0	0	0	0	0
漏缆入口功率/dBm	$i=d-e-g-h$	29.5	5.7	5.7	5.7	8.7	5.7	5.7	9.38
4 m处衰减因子(宽度因子)	$l$	3	3	3	3	3	3	3	3
车体阻挡/dB	$m$	12	12	12	12	12	12	12	13
人体损耗/dB	$n$	3	3	3	3	3	3	3	3
工程余量/dB	$o$	3	3	3	3	3	3	3	3
覆盖边缘场强/dBm	$p$	-85	-105	-105	-105	-105	-105	-105	-105
允许的最大综合损耗/dB	$q=i-l-m-n-o-p$	93.5	89.7	89.7	89.7	92.7	89.7	89.7	92.38
300 m综合损耗(5/4"高频缆)/dB	$r_2$	84.00	84.00	84.00	84.00	84.00	85.00	87.00	88.00
350 m综合损耗(5/4"高频缆)/dB	$r_3$	87.00	87.00	87.00	87.00	87.00	88.00	91.00	93.00
300~350 m区间每米损耗/dB	$r_4$	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.08	0.10
切换时延/s	$s$	1	1	1	1	1	1	1	1
车速/(km/h)	$t$	160	160	160	160	160	160	160	160
切换距离/m	$u=s \times t$	44.44	44.44	44.44	44.44	44.44	44.44	44.44	44.44
单边覆盖距离/m	$v$	458.3	395	395	395.00	445.00	378.33	333.75	343.80
考虑切换单边覆盖距离/m	$w=v-u$	413.9	350.56	350.56	350.56	400.56	333.89	289.31	299.36
单边覆盖距离(估算)/m	$v_1$	443.8	395.00	395.00	395.00	433.75	378.33	333.75	343.80
考虑切换单边覆盖距离(估算)/m	$w_1=v_1-u$	399.3	350.56	350.56	350.56	389.31	333.89	289.31	299.36



号线进行测算,隧道建设成本可节省30%以上。

### 3 已运营地铁隧道5G覆盖方案

已运营地铁的运营商通信系统为2G/3G/4G,已部署的泄露电缆基本为13/8"泄露电缆,截止频率低于3 GHz,无法支撑中国电信和中国联通3.5 GHz的5G频段。在隧道内壁已部署包含地铁专用通信系统在内多条泄露电缆,且为保证隔离度,每2条泄露电缆之间的设计距离在20 cm以上,隧道内壁正对车窗的位置基本占满,没有预留位置给5G网络,如图1所示。

本文提出一种泄露电缆斜射覆盖方案,假设新增2条5G泄露电缆部署在地铁隧道内壁已安装泄露电缆的斜上方处,通过一定的人射角覆盖车厢内部。泄露电缆开口位置指向地铁车厢内中心线用户高度处,确保车厢内超过一半的空间可满足LOS视线传输。

如果新增2条5G泄露电缆可保持到车厢内部的LOS传输,那么可以认为2条泄露电缆的传输模型基本一致,通过在适当的距离安装5G基站设备并控制泄



图1 地铁隧道内环境示意图

漏电缆传输损耗,不但可以满足车厢内部覆盖的信号强度需求,而且可以使2路信号在车厢内信号强度差距保持在3 dB内,实现较好的MIMO效果。新增泄露电缆位置如图2所示。

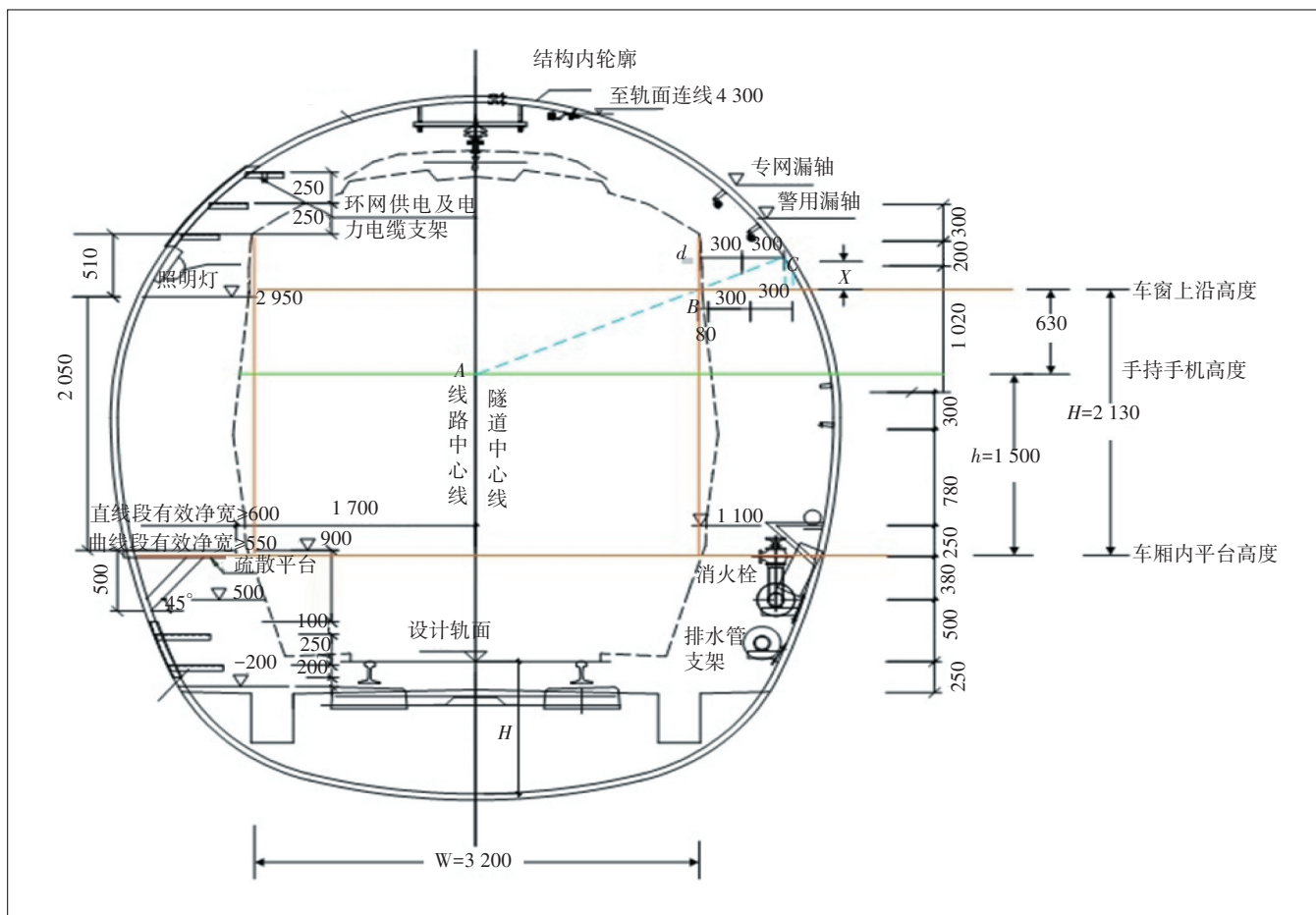


图2 新增泄露电缆位置示意图

假设车身宽度为 $W$ ,列车车窗上沿与洞壁水平距离为 $d$ ,车窗上沿玻璃距离平台高度为 $H$ ,远离车窗侧站立用户手持手机高度为 $h$ ,隧道内壁新增泄漏电缆安装高度,距离车窗上沿的垂直距离为 $X$ 。那么根据几何原理,则有:

$$\frac{d}{0.5 \times W} = \frac{X}{H - h} \quad (3)$$

即新增泄漏电缆安装位置到车窗上沿的垂直高度 $X$ 可表示为:

$$X = \frac{d \times (H - h)}{0.5 \times W} \quad (4)$$

通过新增2条泄漏电缆来解决已运行地铁隧道的5G覆盖时,若2条泄漏电缆安装位置 $X$ 均不高于 $2d \times (H-h)/W$ ,并且开孔方向指向地铁车厢内中心线用户高度时,尽管2条泄漏电缆不是传统平行于车窗覆盖,但仍可有效覆盖车厢内部并实现较好MIMO效果。

## 4 测试验证

### 4.1 低成本5G覆盖方案验证

深圳十号线实现了5G全线覆盖,关闭低频段信号,方案效果与2.4节提出的低成本覆盖方案近似。深圳十号线全线隧道测试结果:SS-RSRP $\geq$ -105 dBm覆盖率达到99.9%,SS-SINR $\geq$ 0 dBm质量达标率为99.8%。远超SS-RSRP $\geq$ -105 dBm且SS-SINR $\geq$ 0 dBm采样点占比 $\geq$ 90%的室内场景验收标准。

### 4.2 已运营地铁隧道5G覆盖方案验证

广州八号线北延线采用已运营地铁的泄露电缆斜射方案,已运营段地铁隧道测试结果:SS-RSRP $\geq$ -105 dBm覆盖率达到99.4%,SS-SINR $\geq$ 0 dBm质量达标率为97.6%。超过SS-RSRP $\geq$ -105 dBm且SS-SINR $\geq$ 0 dBm采样点占比 $\geq$ 90%的室内场景验收标准。

## 5 结束语

本文提出了一种优化频率组合的泄漏电缆覆盖方案,在保证覆盖效果的基础上大幅降低建设成本;同时提出一种泄漏电缆斜射覆盖方案,为隧道壁车窗等高位已全部部署漏缆的已运营地铁的隧道提供5G覆盖。2种方案均在广东地铁线路进行验证,可对新建地铁和运营地铁的5G隧道覆盖提供参考。

### 参考文献:

[1] 杨艳,张涛,郭希蕊,等. 5G公路隧道部署方案及性能验证[J]. 电

信科学,2020,36(10):126-133.

- [2] 潘翔,张涛,李福昌. 高铁隧道场景的5G覆盖方案研究[J]. 邮电设计技术,2019(8):26-29.
- [3] 王波,胡涛. 地铁5G网络建设方案探讨[J]. 通信与信息技术,2019(6):27-28+33-35.
- [4] 朱佳,孙宜军,山笑磊. 地铁民用通信中5G NR与异系统间的干扰隔离度研究[J]. 移动通信,2019,43(8):56-61.
- [5] 杨新,贺肖荣,王进. 支持5G共建共享和多系统共存的地铁隧道覆盖方案[J]. 邮电设计技术,2020(6):17-21.
- [6] 胡煜华,赵伟,李贝. 5G网络地铁场景覆盖方案研究[J]. 电信工程技术与标准化,2020,33(8):40-44.
- [7] 高松,苏雷,程永明. 基于5G的地铁覆盖技术[J]. 移动通信,2020,44(12):29-33.
- [8] 赵喆,李惠君,孙锦. 5G网络在地铁室内分布系统中协同组网模式[C]//5G网络创新研讨会(2020)论文集.《移动通信》编辑部,2020,381-385.
- [9] 李满杰,周红平,唐建伟,等. 北京地铁5G无线网络覆盖方式探讨[C]//中国通信学会. 2019中国信息通信大会论文集(CICC 2019),2019.
- [10] 查昊,朱巧玉. 5G地铁覆盖解决方案探讨[J]. 电信快报,2019(5):21-24.
- [11] 杨峰,李治,符新. 地铁5G无线网络覆盖研究[J]. 中国新通信,2020,22(21):76-77.
- [12] 刘淑凡,张丽. 地铁5G系统覆盖方案设计与仿真[J]. 电子世界,2020(4):136-137+140.
- [13] 铁小辉,朱佳. 地铁民用通信引入5G后的干扰分析[J]. 数字通信世界,2019(8):81+53.
- [14] 杨勇. 地铁5G无线网络覆盖方案探讨[J]. 数字通信世界,2020(10):84-85+108.
- [15] 张琳,樊金坤. 在地铁5G网络建设过程中的规划需求分析[J]. 通讯世界,2020,27(5):132+135.
- [16] 苏凤轩,赵汝桂,陈楚雄. 地铁隧道5G网络覆盖设计方案对比分析[J]. 移动通信,2020(1):1-5.
- [17] 谭飞羿. 5G时代地铁隧道内多系统信号覆盖无源互调干扰分析[J]. Building Development,2019,3(1).
- [18] 丁元锋,吴卉,李高科. 5G NR地铁专网综合承载方案探讨[J]. 铁路计算机应用,2021,30(5):26-31.
- [19] 陈晓,潘韵天,武艺鸣,等. 地铁隧道内多径信道的统计特性[J]. 应用科学学报,2015(4):53-62.
- [20] 孙宜军. 地铁民用通信5G无线覆盖方案探讨[J]. 中国新通信,2019,21(19):40-41.
- [21] 黄智彬,向迪. 5G时代地铁公网通信组网模式研究[J]. 电信技术,2019,545(8):49-53+58.

### 作者简介:

何明,高级工程师,硕士,主要从事无线网络规划建设;彭涛,工程师,学士,主要从事室内分布系统规划设计;梁师铭,工程师,学士,主要从事无线网络规划及优化工作。