



专栏：5G 架构与部署

5G 公路隧道部署方案及性能验证

杨艳, 张涛, 郭希蕊, 潘翔

(中国联合网络通信有限公司研究院, 北京 100048)

摘要: 系统地分析了 3.5 GHz 典型频段部署 5G 公路隧道的方案。综合分析采用新型天线和新型漏缆部署公路隧道的性能, 分别从 RSRP、SINR、速率分布等角度对天线部署方案和漏缆部署方案进行了性能分析, 从覆盖性能、安全要求、成本等方面提出了不同方案的选取建议, 弥补了目前研究在这一方面的空缺, 有力地推动了设备演进。

关键词: 5G; 高速公路; 隧道; 覆盖能力

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020244

5G highway tunnel deployment scheme and performance verification

YANG Yan, ZHANG Tao, GUO Xirui, PAN Xiang

Research Institute of China United Network Communications Co., Ltd., Beijing 100048, China

Abstract: The scheme of deploying highway tunnel in 3.5 GHz typical frequency band of 5G was systematically analyzed. And the performance of the new antenna and the new leaky cable deployed for highway tunnel were comprehensively evaluated by RSRP, SINR, and rate distribution. The coverage performance, safety requirements, cost and other aspects of each scheme were proposed. It made up for the current research gap in this area, provided the first-hand materials for the 5G highway tunnel deployment, and effectively promoted the equipment evolution.

Key words: 5G, expressway, tunnel, covering capacity

1 引言

隧道场景是有别于开阔区域的特殊场景, 其信道环境及安装方法差异性较大, 因此需要基于实际测试获取有效的部署方案。从部署场景区分, 隧道可以分为公路隧道、地铁隧道和铁路隧道。

由于隧道都为密闭孔洞结构, 因此无线信号传播具备一定的相关性; 但隧道高度和宽度、洞体材料及车体穿透损耗的差异性, 导致无线信号传播及信道环境呈现出较大的差异。从相关性角度入手, 隧道场景部署可以通过不同隧道的特征进行映射, 获取初步结论并指导非精确类规划工作;

收稿日期: 2020-04-06; 修回日期: 2020-08-01

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (No.2018YFF0301200)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project (No.2018YFF0301200)

从完整性和准确度分析, 需要对不同隧道进行实验, 获取全面的隧道通信数据, 构建隧道设备及部署方案体系, 从而满足多样化的应用需求。对比公路隧道、地铁隧道和铁路隧道, 三者在部署中存在较大的差异, 可以从安全要求、性价比、车体及隧道特点 4 个方面进行说明。公路隧道一般采用最少两车道部署, 隧道宽度较大, 但是车体较短, 穿透损耗仅为 5~6 dB, 且部署设备的安全性要求较弱, 对性价比的要求较高, 因此部署中主要考虑高性价比方案; 高铁隧道由于高速运行要求, 普遍要求安全性较高, 且车体较长, 车体在 5G 部署下穿透损耗达到 35 dB, 因此部署中需要重点考虑安全性要求; 地铁隧道介于高铁隧道和公路隧道之间, 且需要考虑用户容量影响, 因此部署方案一般为折中方案。

公路隧道作为公路的重要组成部分, 截止至 2016 年年底, 中国公路隧道有 15 181 处, 长达 14 039 km, 其中 1~3 km 的长公路隧道有 3 520 处, 大于 3 km 的特长隧道公路隧道有 815 处^[1]。但是现在的研究主要聚焦 5G 地铁隧道和高铁隧道部署^[2-5], 而极少有 5G 公路隧道的研究。本文将从方案和试验验证对 5G 典型频段 3.5 GHz 部署公路隧道进行研究。

2 公路隧道电波传播分析

公路隧道, 尤其是长隧道, 属于密闭的受限空间, 无线信道具有高度随机性, 受物理环境的影响极大, 因此需要明确隧道内电磁波的传播机制才能了解 5G 部署中的问题。通常来讲, 电磁波的传播机制可以归纳为反射、透射和衍射。在公路隧道内, 电磁波既可以沿天线方向进行视距传输, 还可以在隧道壁及障碍物表面发生多次反射最终达到接收天线; 公路隧道内大部分用户位于车内, 其收发天线处于隧道内行驶的车体内, 电磁波会透射到达接收天线; 当电磁波被尖锐的边

沿遮挡时, 还会发生衍射, 由边沿表面产生的第二波将继续传播到接收天线。同时, 无线信号在隧道内传播时还会引起信号衰落, 信道衰落分为大尺度衰落和小尺度衰落。大尺度衰落主要指路径损耗和阴影损耗。小尺度衰落指快衰落, 小尺度一般情况下影响较小。

公路隧道系统采用无线自由波接入, 相比室外无线信道, 由于公路隧道的宽度、高度和形状不同, 导致无线电波在隧道中反射、折算特性差异较大, 从大尺度传播特性看, 导致传播表征的波导特性不同, 公路隧道电波传播分析如图 1 所示; 从小尺度传播特性看, Key Hole (锁孔) 效应、多径色散、时变 Doppler (多普勒) 特性、MIMO 空间相关性等信道特征也会显著不同。此外, 公路隧道的隧道弯曲区间、多车同时行驶等特殊场景, 也会对无线电波传播的差异构成重要影响。

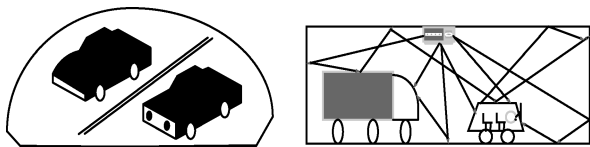


图 1 公路隧道电波传播分析

3 5G 公路隧道部署方案

4G 阶段, 公路隧道都是采用 13/8 漏缆进行部署, 尚无天线部署方案。但是随着 5G 主流频段 3.5 GHz 影响与原有的漏缆的截止频率为 3 GHz 间产生了矛盾, 无法满足 5G 部署要求。且由于 5G 基站功率及成本较高, 性能和成本都将成为 5G 公路隧道部署的主要影响因素。因此从综合性价比的角度, 提出“新型 5/4 漏缆公路隧道 5G 覆盖方案”和“新型 4T4R 贴壁天线公路隧道 5G 覆盖方案”技术方案。下面会详细介绍这 2 种方案。

(1) 新型 5/4 漏缆公路隧道 5G 覆盖方案

新型 5/4 漏缆公路隧道 5G 覆盖方案是针对 5G 典型频率 3.5 GHz 部署公路隧道的方案。漏缆



方案采用 5G 和（或）4G RRU 设备，并采用 2 根漏缆进行 NSA/SA 部署。由于传统 13/8 漏缆的截止频率为 3 GHz 以下，无法满足 5G 典型频率使用要求。因此进一步地开发了传统 5/4 漏缆产品和新型等电平 5/4 漏缆产品。其中，传统漏缆采用固定的开槽方式，传输损耗随距离线性衰减，耦合损耗固定；等电平漏缆采用连续的、变化的开槽方式，传输损耗随距离呈曲线衰减，耦合损耗不固定，可以有效地保证覆盖边缘的数据速率。新型 5/4 漏缆公路隧道 5G 覆盖方案如图 2 所示。

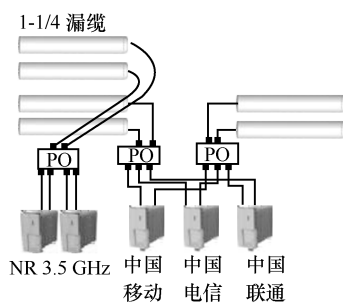


图2 新型 5/4 漏缆公路隧道 5G 覆盖方案

（2）新型 4T4R 贴壁天线公路隧道 5G 覆盖方案

隧道采用天线进行覆盖和部署，不仅在 5G 时代是一种新体验和性价比较高的方案，在 4G 阶段也是一种较好的部署方案。隧道部署中需要使用特性天线，这种天线需要与隧道壁紧密贴合，因此采用八木贴壁天线进行部署。使用八木天线进行部署的示意图如图 3 所示。

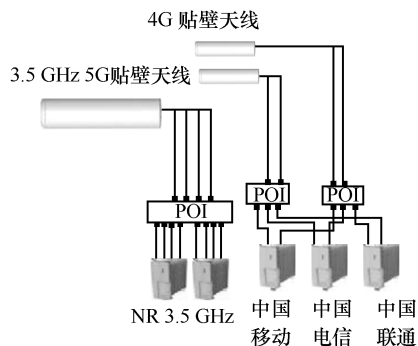


图3 新型 4T4R 贴壁天线公路隧道 5G 覆盖方案

4 5G 公路隧道部署试验验证

4.1 试验环境及基本设置说明

5G 公路隧道部署试验验证在阳灵隧道进行，阳灵隧道基本情况如图 4 所示。通过在同覆盖位置部署漏缆和天线，分别对比了采用新型贴壁天线和 5/4 漏缆部署的覆盖性能。隧道全长 1 km，净宽 14 m，净高 5 m，两侧为 2.5 m 宽自行车道。在距离起点 240 m 的位置部署了漏缆和天线，漏缆长度为 400 m。整个测试采用 NSA 组网架构。NR 设备为 8 通道设备，功率为 8×30 W。

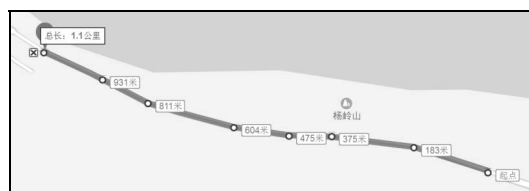


图4 阳灵隧道基本情况

下面将分别对天线部署方案和漏缆部署方案的测试验证情况进行分析，对上行覆盖能力、下行覆盖能力、建网指标等给出分析。

4.2 天线部署方案测试验证

（1）上行覆盖能力测试情况分析

试验验证采用相同网络配置多次遍历测试的方法，隧道内的车速保持在 60 km/h。图 5 分别给出了 3 次迭代测试中 RSRP、SINR 和上行速率随覆盖距离的分布情况。RSRP 随着距离的增加，呈现直线下降趋势，到覆盖 900 m 时 RSRP 达到 -110 dB。SINR 变化较小，到出隧道出口出现较大抖动。上行吞吐量也呈现线性下降趋势，900 m 对应的吞吐量为 1 Mbit/s。

由于天线部署时，会出现“塔下黑”现象，即在天线的极近的位置会由于天线波瓣水平和垂直波束宽度的影响，信号强度下降。因此在测试中可以看到在 100 m 内的覆盖范围内出现 RSRP 和 SINR 值的一些跳动。此外由于天线覆盖的隧道全长只有 900 m，因此邻近隧道出口的位置，

由于电磁波传播方式改变, 折射、衍射和反射的信号减少等影响, SINR 在出口处发生了较大的波动。同时由于隧道内测试, 会出现较多的车辆通行, 导致反射或折射变化, 出现个别点的 SINR 突变。因此在分析中本文在给出部署建设时采用多次测试, 取综合值的方式进行评估, 减少车体遮挡等不明确因素对实验结果的影响。

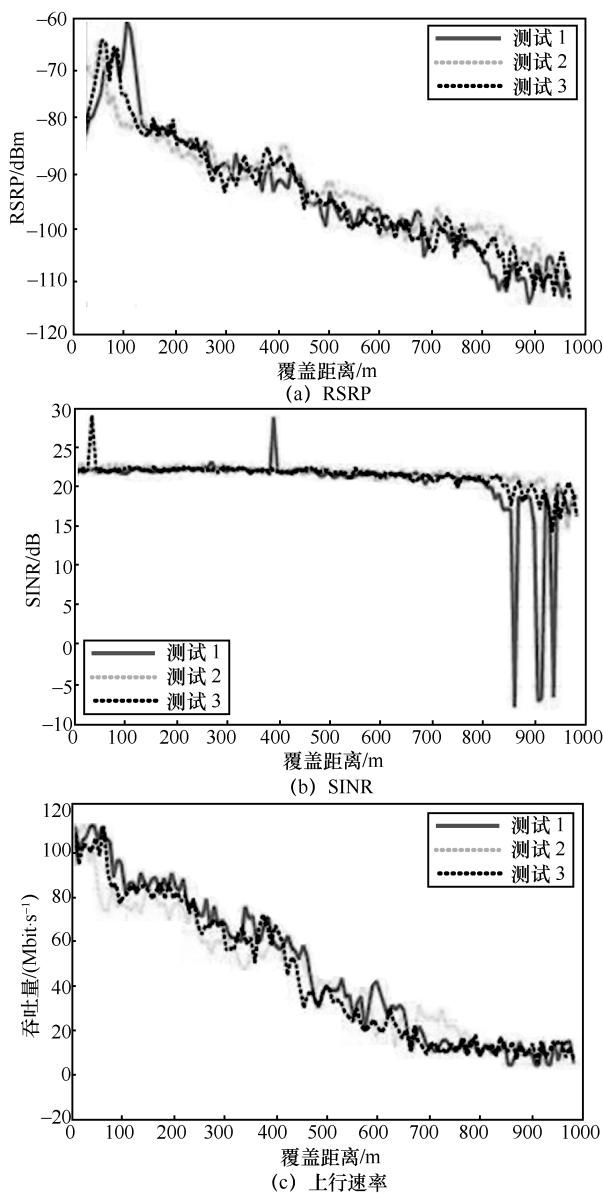


图5 天线部署方案覆盖能力

图6给出了统计全部测试数据的CDF分布情况分析, 即可以从统计学角度看出采用天线部署

且数据分流为5G优先的情况下, 采样点的RSRP、SINR分布情况。其中, 边缘5%覆盖对应RSRP -110 dBm; 98%以上采样点对应的SINR大于15 dB, 因此总体来看, 采用天线部署可以较好地进行公路隧道上行覆盖。

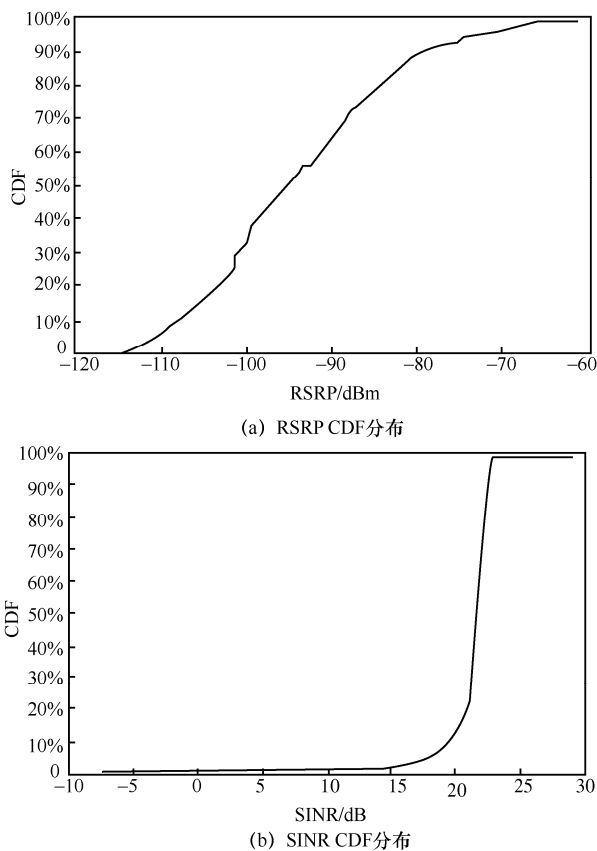


图6 天线部署方案网络参数分布情况

(2) 下行覆盖能力测试情况分析

图7给出了3次测试中, 获取的RSRP、SINR和下行速率与覆盖距离的情况。从图7可以看出RSRP随着距离的增加, 呈现直线下降趋势, 到覆盖900 m时RSRP达到 -110 dBm; SINR变化较小, 到出隧道出口出现较大抖动; 下行吞吐量也呈现线性下降趋势, 800 m对应的吞吐量为300 Mbit/s, 在隧道出口出现吞吐量波动。

图8是从统计的角度给出下行覆盖的网络参数分布情况, 从图8中可以看出, 边缘5%覆盖对应RSRP -115 dBm, SINR为15 dB, 平均RSRP

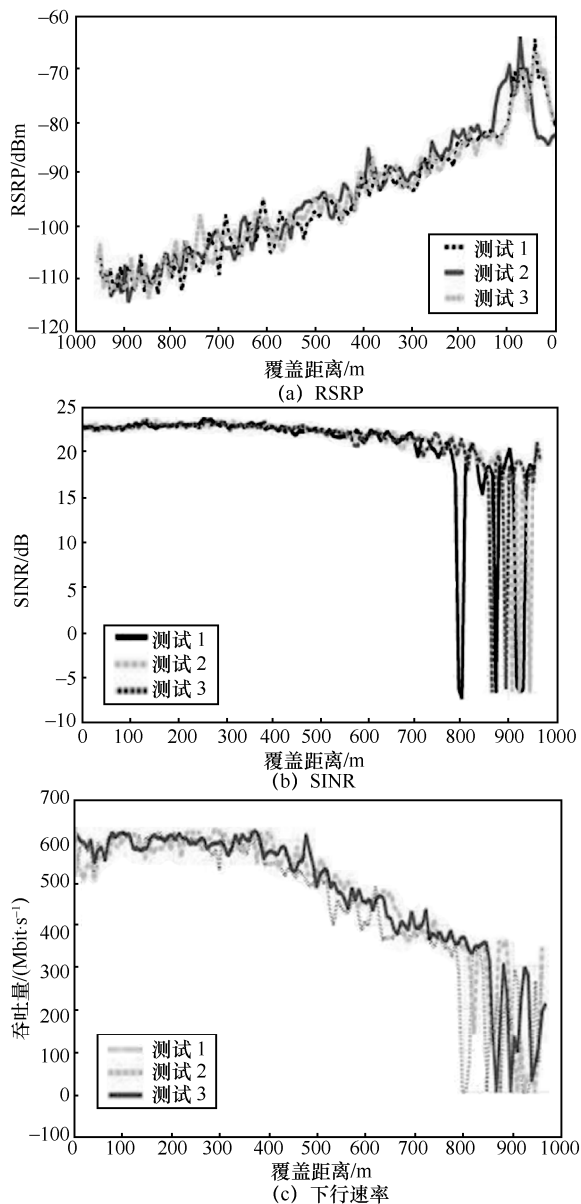


图7 天线部署方案覆盖能力

率要求，本文分析了保证网络指标、覆盖距离及下行吞吐量。按照上行边缘速率 1 Mbit/s 的基本要求，由于本次测试中隧道长度限制，因此采用趋势外推方法，给出了一个基站可以覆盖的距离。表 1 给出了天线部署方案推荐的建网指标，单个基站覆盖距离为 899 m，下行吞吐量为 202 Mbit/s。

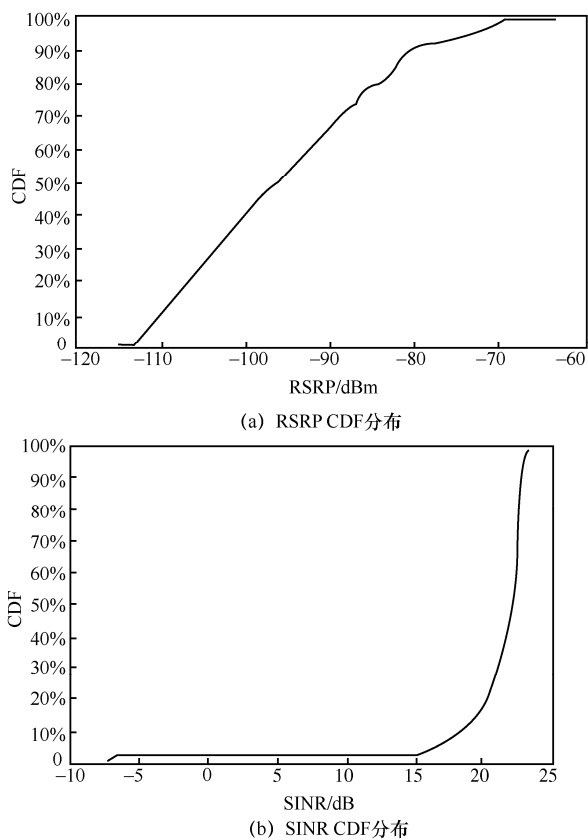


图8 天线部署方案网络参数分布情况

为-96 dBm，平均 SINR 为 22 dB。总体下行覆盖情况较好。

(3) 建网指标建议

通过测试试验及 5G 网络建网的上行边缘速

4.3 漏缆部署方案测试验证

(1) 上行覆盖能力测试情况分析

图 9 从采样点的粒度，通过分析 3 次覆盖遍历情况，可以看出采用漏缆部署网络性能会有一

表 1 天线部署方案推荐的建网指标

基本情况		双天线方案			
		RSRP/dBm	SINR/dB	距离/m	对应的下行吞吐量/(Mbit·s ⁻¹)
车载	上行边缘速率为 1 Mbit/s	-110.1	18.6	899	202

定范围的抖动。综合考虑多次测试的结果,采用 RSRP、上行速率对覆盖距离较为敏感,RSRP 为 -110 dBm 对应的覆盖距离为 350 m。SINR 在覆盖距离 350 m 以内的变化较小,速率则变化较为明显。

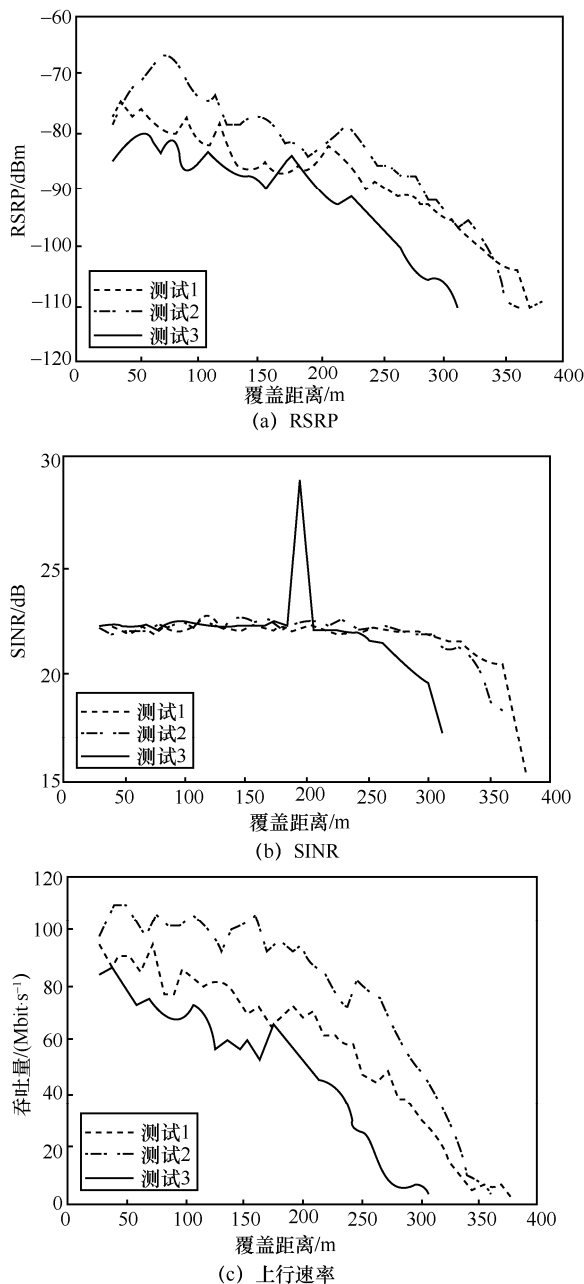


图9 漏缆部署方案覆盖能力

采用漏缆部署与天线部署的影响因素相同,也会有“塔下黑”的影响,RSRP 会少量跳变,同时受到隧道内车辆的遮挡等的影响,SINR 和

RSRP 会出现极少点的跳变,但是总体的变化较少。

图 10 给出了采用漏缆进行部署下,多次数据整合后 RSRP 和 SINR 的 CDF 分布情况,从图 10 中可以看出覆盖 5% 对应的 RSRP 为 -112.5 dBm, SINR 为 17 dB; 50% 覆盖对应额 RSRP 为 -88 dBm, SINR 为 22 dB。

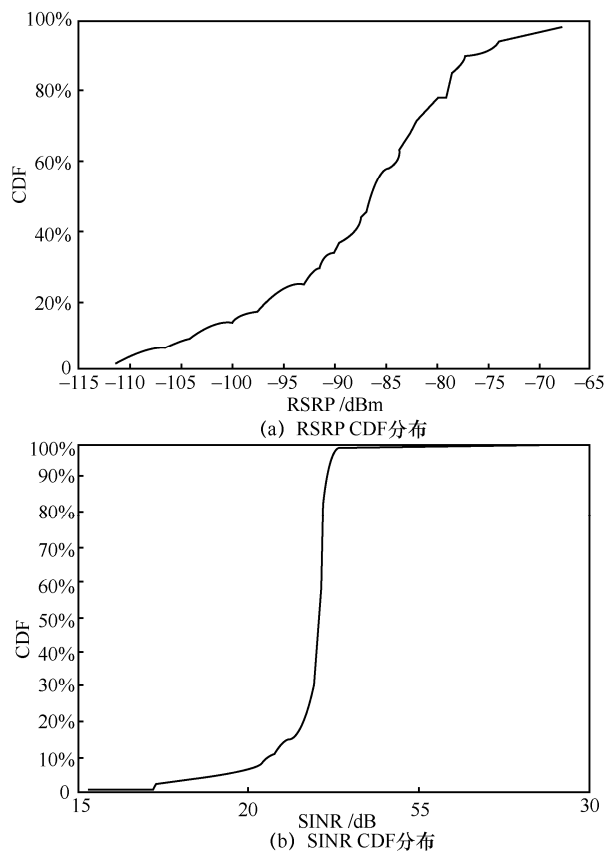


图 10 天线部署方案网络参数分布情况

(2) 下行覆盖能力测试情况分析

图 11 从采样点的粒度,给出了采用漏缆部署的下行覆盖能力,从图 11 中可以看出,下行 RSRP、SINR 和速率的变化没有上行的变化明显,而是缓慢下降,直到覆盖距离达到 200 m 后采用有较快的下降。定性地看,覆盖距离为 350 m 时,下行速率为 150 Mbit/s。因此下行覆盖不受限。由于第一次测试中出现了大型客车遮挡的影响,导致下行速率出现了较为明显的波动,这也反映出隧道内的信号质量会大受到大量不确定因素的影响。

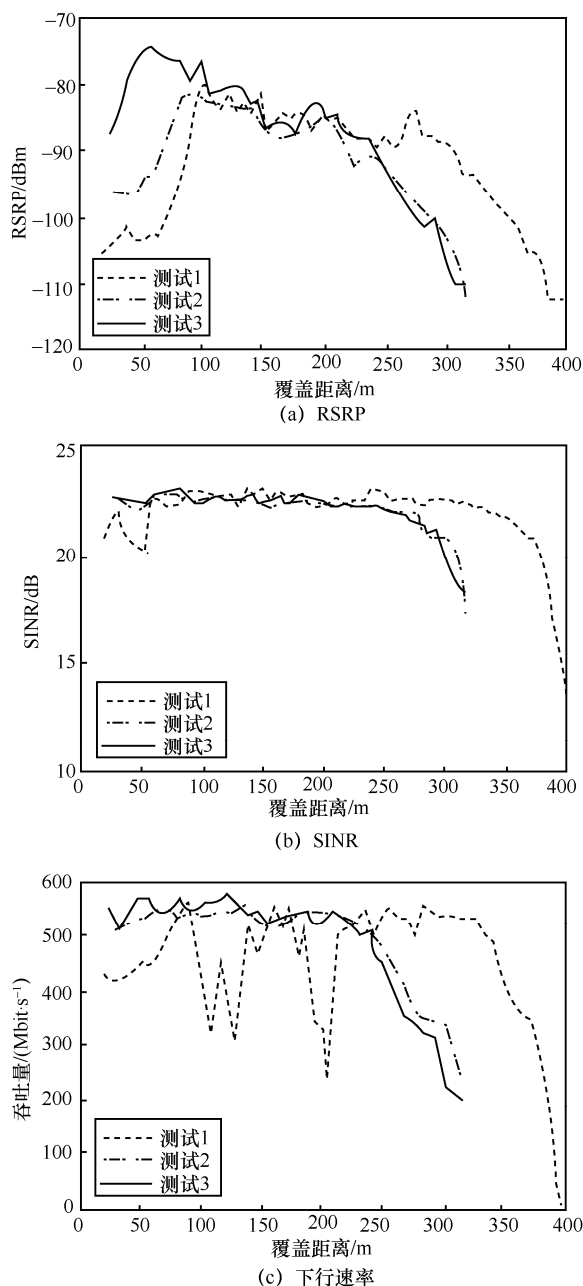


图 11 漏缆部署方案覆盖能力

图 12 给出了采用统计分析方法, 给出了网络参数分布情况。从图 12 中可知, 5%覆盖范围对

应的 RSRP 为-108 dBm, SINR 为 16 dB; 50%覆盖对应的 RSRP 为-87 dBm, SINR 为 22.5 dB。可以看出下行覆盖的电平值较好。

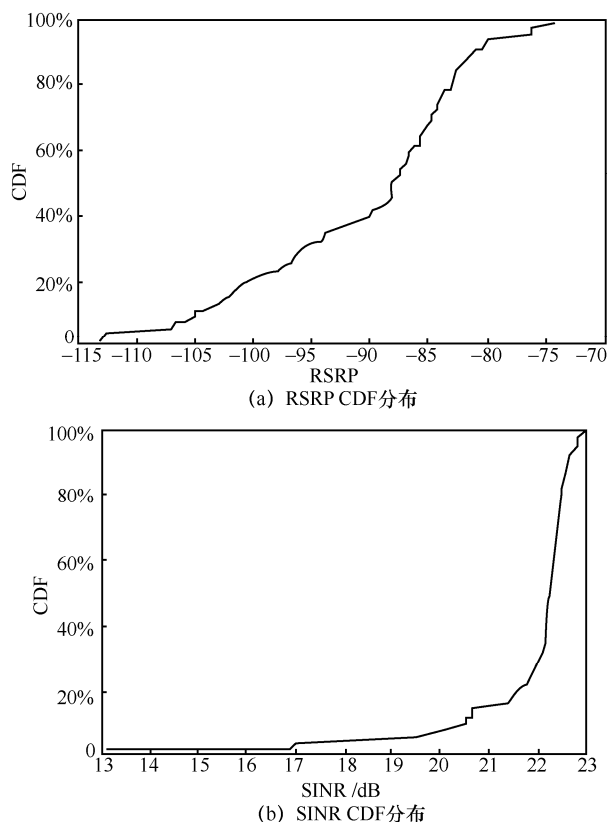


图 12 天线部署方案网络参数分布情况

(3) 建网指标建议

按照上行边缘速率 1 Mbit/s 的基本要求和部署实际情况, 给出了一个基站可以覆盖的距离。表 2 中给出了漏缆部署方案推荐的建网指标, 单个基站覆盖距离为 375 m, 下行吞吐量为 116 Mbit/s。采用漏缆部署方案覆盖范围较少, 但是符合目前部署的安全要求, 因此需要综合考虑, 进行部署。

表 2 漏缆部署方案推荐建网指标

基本情况		双天线方案			
		RSRP/dBm	SINR/dB	距离/m	对应的下行吞吐量/(Mbit·s ⁻¹)
车载	上行边缘速率为 1 Mbit/s	-109	17.7	375	116

表3 不同部署方案综合分析

方案	安全等级	成本	单基站覆盖距离
天线方案	偏低（需要相关部门认定）	偏低（千元/天线）	900 m
漏缆方案	较高（目前常规的部署方式）	偏高（千元/百米）	375 m

4.4 5G 公路隧道总体部署方案建议

综合上述的两种隧道部署方案，可以看出其具备不同的部署特征和成本需求，因此需要给出总体部署原则。表3给出了从安全等级、设备成本和覆盖距离3个角度进行了分析。

因此从表3来看，针对安全要求不是很高且可以部署天线的场景建议使用天线方案进行部署，可以获得极高的性价比；而安全要求较高无法接受天线安装的场景，可以沿用原有的漏缆部署方案。

5 结束语

本文系统地分析了5G公路隧道部署的两种关键方案，并开展了5G典型频率部署公路隧道的实验验证，从天线特性、漏缆支持情况进行了深化分析，给出了基于天线的5G公路隧道和基于漏缆5G公路隧道方案的性能对比，弥补了该项研究的空缺，为5G公路隧道设备开发和进一步优化部署提供了依据。此外，本文还从部署的安全级别、部署成本和覆盖能力进行分析，综合给出了5G公路隧道部署建议。

目前，5G隧道覆盖仍处于初步部署阶段，目前仅验证了3.5 GHz下NSA组网架构下的覆盖能力，尚未对SA架构下的网络情况进行实验和分析，因此后续会进一步对SA架构下5G覆盖能力进行分析，并同步开展公网与车联网特有频段合设后，设备性能及覆盖能力的分析，从而进一步丰富5G公路隧道多样化部署的要求。

参考文献：

- [1] 连欣. 中国联通携手合作伙伴 完成公路隧道5G试点部署及试验验证[N]. 人民邮电报, 2019-08-06.
LIAN X. China Unicom and partners complete the 5G pilot

deployment and test verification of road tunnels[N]. Renmin Youdian, 2019-08-06.

- [2] 张晓江, 吴丽勇. 5G 高铁隧道覆盖方式分析[J]. 移动通信, 2020, 44(3): 85-88, 96.
ZHANG X J, WU L Y. Analysis of 5G high-speed rail tunnel coverage[J]. Mobile Communications, 2020, 44(3): 85-88, 96.
- [3] 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.
PAN X, ZHANG T, LI F C. Research on 5G coverage scheme of high-speed rail tunnel scene[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2019(8): 26-29.
- [4] 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.
LIU S F, ZHANG L. Design and simulation of metro 5G system coverage scheme[J]. Electronics World, 2020(4): 136-137, 140.
- [5] 黄国晖, 吴昊. 高铁隧道覆盖中的“POI+泄漏电缆”解决方案[J]. 中国新通信, 2010(9): 78-84.
HUANG G H, WU H. “POI/leak cable” solutions in tunnel covering of high speed railway[J]. China New Telecommunications, 2010(9): 78-84.

[作者简介]



杨艳（1984—），女，博士，中国联合网络通信有限公司研究院高级工程师，主要从事无线通信关键技术研究工作。

张涛（1979—），男，中国联合网络通信有限公司研究院高级工程师，主要从事移动通信技术标准化、组网应用方案研究工作。

郭希蕊（1982—），男，中国联合网络通信有限公司研究院高级工程师，主要从事移动通信新技术测试验证、组网方案研究工作。

潘翔（1992—），男，中国联合网络通信有限公司研究院工程师，主要从事移动通信新技术测试验证、组网方案研究工作。