

系统地铁区间 800M 无线信号优化的自由空间损耗应用研究

潘成灿¹ 何雨毅¹ 欧伟恒² 李志龙^{3*} 刘亚杰^{3*}

1. 广州地铁集团有限公司运营事业总部 广东广州 510220

2. 广州商学院 广东广州 511363

3. 公诚管理咨询有限公司 广东广州 510610

摘 要: 地下轨道交通 800M 无线通信系统是行车安全与调度传输的核心。本文针对广州地铁三号线及三北线长区间因设备老化、无直放站导致的 800M 信号中断问题,提出基于自由空间损耗理论的切换阈值优化方案。梳理目标线路无线系统,明确手持台(灵敏度 -110dBm)、车载台(灵敏度 -115dBm)正常使用需信号 $\geq -90\text{dBm}$;基于弗里斯方程推导损耗模型,验证地下漏缆传输与该理论适配(差距 $<10\%$,误差 $\pm 1\text{dBm}$),并构建切换阈值优化模型。在大石至汉溪长隆 3.2km 区间实测,将阈值从 4dBm 优化至 6dBm ,上下行信号中断长度分别从 820m 、 780m 缩至 180m 、 150m ,手持台可用率从 74.4% 、 76.3% 升至 94.4% 、 95.3% 。该方案可有效提升信号可靠性,为类似工程提供参考。

关键词: 地下轨道交通; 800M 无线信号; 自由空间损耗; 切换阈值; 信号中断优化

引言

随着城市化进程加速,地下轨道交通日均客运量持续增长,其通信系统的稳定性直接关联行车安全与运营效率。800M 频段因穿透损耗低、覆盖距离远,成为地铁无线调度通信(司机-车站-调度)的核心频段。广州地铁三号线及三北线作为核心线路,运营年限超 10 年,近年来频发区间 800M 无线信号中断问题,经分析,主要是由于长区间(如大石至汉溪长隆, 3.2km)中部因设备老化导致信号传输损耗升高,且未安装直放站补盲,手持台通话断续甚至中断,存在运营安全隐患。

1 研究背景与无线系统特性

1.1 无线系统设备组成

广州地铁三号线及三北线采用摩托罗拉 800M 系统,由主站、基站、及天馈线等设备组成,系统结构如图 1 所示。

(1) 主站设备

主站为线路共用设备,核心功能是接收各基站数据包并分发,关键组件包括:

ZC 服务器(负责基站切换控制); SDR 服务器(处理软件无线电信号); NTP 服务器(同步全网时间); CAD 服务器(负责调度指令处理、运营数据可视化与存储,协同支撑行车调度); 核心交换机(实现主站与基站的数据交互)。

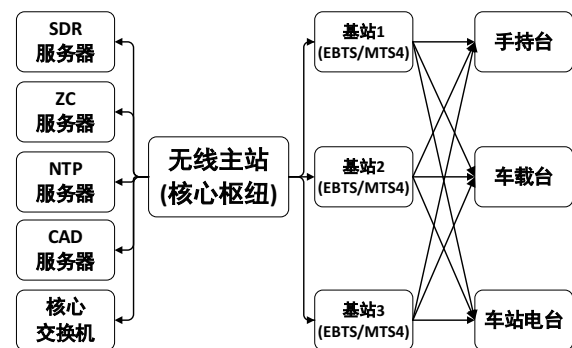


图 1 无线系统结构框图

(2) 基站设备

表 1 三号线及三北线基站设备参数对比表

线路	基站型号	核心组件	冗余设计	集成度	应用站点
三号线	EBTS	电源、天馈系统、双工器、接收多路耦合器、合路器、发射隔离器、控制器、收发信机	无	低	多数站点
三北线	MTS4	电源、控制器、收发信机(集成耦合器/隔离器)	无	中	常规站点
升级站点	新型 MTS4	电源、主备控制器、主备收发信机(集成耦合器/隔离器)	主备冗余	高	厦滘、珠江新城

三号线与三北线基站型号不同，核心参数对比见表 1。

EBTS 基站信号收发需多模块协同，原理如图 2 所示。而 MTS4 基站因集成度高，收发流程简化，但无冗余设计，设备故障风险较高。

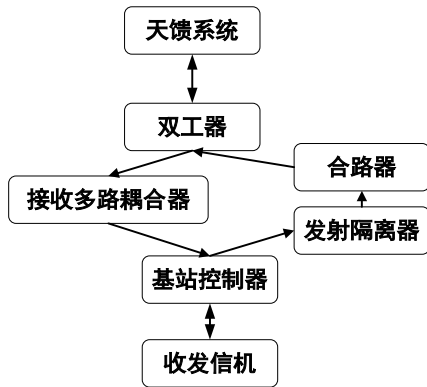


图 2 EBTS 无线基站信号收发原理图

1.2 无线移动设备工作原理

无线移动设备包括手持台（车站人员使用）、车载台（列车司机使用）、车站电台，其工作状态由接收信号强度决定，具体对应关系见表 2。

由表 2 可知，设备正常使用的核心阈值为 $\geq -90\text{dBm}$ ，车载台因灵敏度更高（ -115dBm ），在弱信号区域的适配性优于手持台。

表 2 无线移动设备信号强度与工作状态对应表

设备类型	接收机灵敏度 (dBm)	信号强度范围 (dBm)	工作状态	通话质量
手持台	-110	≥ -90	正常使用	清晰流畅
手持台	-110	$-110 \leq \text{信号强度} < -90$	受限使用	断续、不清晰
手持台	-110	< -110	无法使用	中断
车载台	-115	≥ -90	正常使用	清晰流畅
车载台	-115	$-115 \leq \text{信号强度} < -90$	受限使用	轻微断续
车载台	-115	< -115	无法使用	中断

1.3 切换阈值参数现状

当移动设备在区间行驶时，需从当前站基站切换至邻站基站，该功能依赖主站设置的切换阈值 μ （邻站与当前站信号强度差值）。切换逻辑为：若邻站信号强度 \geq 设备灵敏度，且信号强度差值 $\Delta p \geq \mu$ ，则触发切换，切换区域集中在区间中部（仅此处能同时接收两站信号）。

当前三号线及三北线切换阈值统一设置为 4dBm ，但因设备老化、区间长度差异，该参数导致长区间中部出现信号中断：切换过早（ μ 过小）时，邻站信号未达 -90dBm 即切换，手持台通话断续；切换过晚（ μ 过大）时，当前站信号已低于 -110dBm 仍未切换，手持台中断。

2 自由空间损耗理论与地下场景适配性

2.1 自由空间损耗理论基础

自由空间损耗指电磁波在无耗介质中传播时，因能量扩散导致的衰减，核心计算模型基于弗里斯方程。

(1) 功率密度计算

设发射天线为理想各向同性天线（无损耗），发射功率为 P_t ，则接收点处的功率密度 S_0 （单位面积功率）为：

$$S_0 = \frac{P_t}{4\pi d^2} \quad (1)$$

式（1）中： d 为发射点与接收点距离（km）； $4\pi d^2$ 为球面波扩散面积。

(2) 接收功率计算

接收天线若为理想各向同性天线，其有效面积 A_r 与波

长 λ 的关系为 $A_r = \frac{\lambda^2}{4\pi}$ ，则接收功率 P_r 为：

$$P_r = S_0 \cdot A_r = \frac{P_t \lambda^2}{(4\pi d^2)} \quad (2)$$

式中： λ 为信号波长（m），与频率 f （MHz）的关系

为 $\lambda = \frac{c}{f}$ （ c 为光速， $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ）。

(3) 损耗分贝转换

自由空间损耗 L_0 （dB）定义为 P_t 与 P_r 的比值的对数形式，

将式（2）代入并化简，结合 λ 与 f 的关系，得：

$$L_0 = 10\log \frac{P_t}{P_r} = 32.4 + 20\log d + 20\log f \quad (3)$$

式（3）为地下场景信号衰减计算的核心公式，当

$f=800\text{MHz}$ 时，公式可进一步简化为： $L_0=32.4+20\log d+20\log$

$$800=32.4+20\log d+58.06=90.46+20\log d \quad (4)$$

2.2 地下漏缆传输的适配性验证

地铁区间信号通过漏缆覆盖,漏缆传输损耗与自由空间损耗的差异是理论应用的关键。通过实验测发现,漏缆传输损耗与自由空间损耗的差距 <10%,且当为区间长度时,

计算误差可控制在 $\pm 1\text{dBm}$ 内。其损耗对比如表 3。

由表 3 可知,当 $\approx 3.2\text{km}$ (大石至汉溪长隆区间) 时,两者差值仅 0.94dB ,误差 <1%,因此可通过自由空间损耗理论计算地下区间信号衰减。

表 3 漏缆传输损耗与自由空间损耗对比 ($f=800\text{MHz}$)

区间长度 d (km)	自由空间损耗 L_0 (dB)	漏缆传输损耗 L_c (dB)	差值 (L_c-L_0) (dB)	误差率 (%)
1	$90.46+20 \times 0=90.46$	91.2	0.74	0.82
2	$90.46+20 \times 0.301=96.5$	97.1	0.6	0.62
3.2	$90.46+20 \times 0.505=100.56$	101.5	0.94	0.93

3 切换阈值参数优化设计

3.1 优化目标与约束条件

(1) 优化目标

确保移动设备在区间中部切换时,信号强度 $\geq -90\text{dBm}$,即切换点信号强度满足:

$$P_{r1} \geq -90\text{dBm}, P_{r2} \geq -90\text{dBm} \quad (5)$$

式中: P_{r1} 为当前站基站在切换点的信号强度; P_{r2} 为邻站基站在切换点的信号强度。

(2) 约束条件

1) 区间长度 d 已知 (如大石至汉溪长隆 $d=3.2\text{km}$);

2) 车站站台处基站信号强度可实测 (本文实测大石站 $P_{r0}=-45\text{dBm}$, 汉溪长隆站 $P_{r0}=-47\text{dBm}$);

3) 切换阈值 μ 需满足 $\Delta p=|P_{r2}-P_{r1}| \geq \mu$ 。

3.2 切换阈值计算模型

(1) 切换点信号强度计算

切换点为区间中点,距离两站均为 $\frac{d}{2} = 1.6\text{km}$,根据式 (4) 计算中点处自由空间损耗 L_0 : $L_0=90.46+20\log 1.6=90.46+20 \times 0.204=94.54\text{dBm}$ (6)

则中点处信号强度为站台信号强度减去损耗:

$$P_{r1}=P_{r01}-L_0=-45-94.54=-139.54\text{dBm} \quad (7)$$

$$P_{r2}=P_{r02}-L_0=-47-94.54=-141.54\text{dBm} \quad (8)$$

(2) 最优切换阈值计算

信号强度差值 $\Delta p=|P_{r2}-P_{r1}|=2\text{dB}$,实际中设备老化导致损耗增加 10%~15%,因此需考虑损耗余量 L (取 15%):

$$L_{\text{余量}}=L_0 \times 15\%=94.54 \times 0.15 \approx 14.18\text{dB} \quad (9)$$

修正后中点信号强度:

$$P_{r1}'=-45-(94.54+14.18)=-153.72 \quad (10)$$

$$P_{r2}'=-47-(94.54+14.18)=-155.72 \quad (11)$$

修正后信号强度差值 $\Delta p'=2\text{dB}$,结合设备灵敏度冗余

(手持台 -110dBm),最优切换阈值需满足:

$$\mu=\Delta p'+4\text{dB}=6\text{dBm} \quad (12)$$

(注: 4dB 为冗余量,避免环境干扰导致切换误判)

3.3 优化参数验证

若 $\mu < 6\text{dBm}$ (如当前 4dBm),则邻站信号未达 -90dBm 即切换,手持台通话断续;若 $\mu > 6\text{dBm}$ (如 8dBm),则当前站信号已低于 -110dBm 仍未切换,手持台中断。因此, 6dBm 为该区间的最优切换阈值。

4 实试验证与效果分析

4.1 测试环境与方案

(1) 测试环境

1) 测试区间:大石至汉溪长隆区间 (长度 3.2km ,无直放站,设备老化程度中等);

2) 测试设备:手持台 (灵敏度 -110dBm)、路测仪 (采样频率 1Hz)、车载台 (灵敏度 -115dBm);

3) 测试指标:信号中断长度 (信号强度 $< -110\text{dBm}$ 的区间长度)、手持台可用率 (信号强度 $\geq -90\text{dBm}$ 的区间占比)、车载台可用率 (信号强度 $\geq -90\text{dBm}$ 的区间占比)。

(2) 测试方案

1) 优化前:切换阈值 $\mu=4\text{dBm}$,分别测试上行 (大石 \rightarrow 汉溪长隆)、下行 (汉溪长隆 \rightarrow 大石) 区间路测数据;

2) 优化后:切换阈值 $\mu=6\text{dBm}$,重复上述测试;

3) 对比分析优化前后的指标差异。

4.2 测试结果与对比

(1) 路测图对比

优化前上下行区间路测结果如图 3 所示。通过图 3 可以看出,大石至汉溪长隆上下行区间中部 (处) 信号强度 $< -110\text{dBm}$ 均出现较长的信号中断区域,中断区域明显,该情况使无线设备无法在该区间中保持可正常使用状态。

通过自由空间损耗理论,结合大石站至汉溪长隆站的区间长度以及三号线及三北线无线基站信号的频率,计算得出最优切换阈值参数。按照计算所得的最优切换阈值参数对汉溪长隆站的切换阈值参数进行调整后,信号中断区域明显缩小。优化后如图4所示,中断区域缩短至处,无线移动设备的可靠性明显提高。

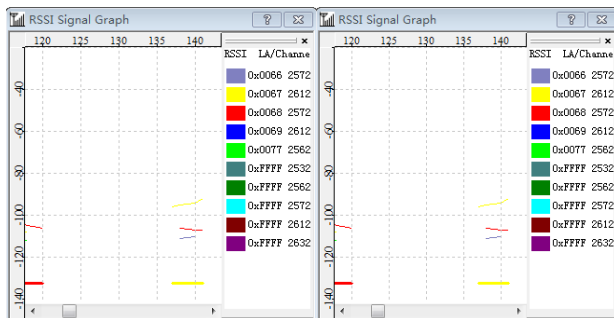


图3 优化前大石/汉溪长隆上下行区间路测图

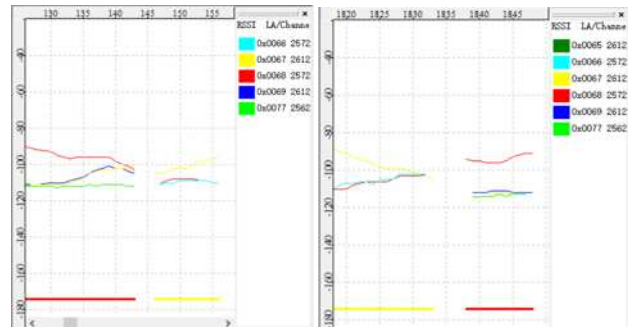


图4 优化后大石/汉溪长隆上下行区间路测图

(2) 量化指标对比

优化前后核心指标对比见表4,可见信号中断长度、设备可用率均显著改善。

4.3 结果分析

1) 优化效果:切换阈值从4dBm调整至6dBm后,上行中断长度缩短78.0%,下行缩短80.8%,手持台可用率提升20%以上,满足运营需求;

表4 大石至汉溪长隆区间优化前后测试指标对比表

优化状态	测试方向	切换阈值	信号中断长度	手持台可用率	车载台可用率	通话质量评价
优化前	上行	4	820	74.4	89.1	断续、频繁中断
优化后	上行	6	180	94.4	98.8	清晰、无中断
优化前	下行	4	780	76.3	90.5	断续、偶尔中断
优化后	下行	6	150	95.3	99.2	清晰、无中断

2) 残留中断原因:区间长度3.2km且无直放站,中点信号强度约-154dBm(修正后),低于手持台灵敏度-110dBm,因此仍有少量中断,但车载台因灵敏度更高(-115dBm),无中断;

3) 扩展性:该方案可推广至其他长区间,只需根据区间长度d、站台信号强度 P_{00} 重新计算最优 μ ,成本仅为硬件改造的1/10。

5 结论与展望

5.1 研究结论

1) 广州地铁三号线及三北线800M信号中断的核心原因是切换阈值参数与区间长度、设备老化不匹配,而非单纯硬件问题;

2) 自由空间损耗理论可适配地下漏缆场景,当 $f=800\text{MHz}$ 时,损耗计算误差 $<1\%$,为切换阈值优化提供可靠理论支撑;

3) 大石至汉溪长隆区间的实测表明,将切换阈值从4dBm优化至6dBm,可使信号中断长度缩短78%以上,手持台可用率提升至94%以上,有效保障运营安全。

5.2 未来展望

1) 结合5G RedCap技术^[7],将自由空间损耗理论与多频段信号融合,进一步提升弱信号区域覆盖;

2) 开发切换阈值自适应算法,实时根据设备老化程度、环境干扰调整 μ ,实现动态优化;

3) 针对超长大区间($d>4\text{km}$),结合直放站部署与阈值优化,构建“硬件补盲+参数优化”的复合方案。

参考文献:

[1] 国际电信联盟 (ITU). 自由空间衰减的计算 [S]. 2016.
[2] 歌德史密斯. 无线通信 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
[3] 帕默维斯瓦纳. 无线通信基础 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
[4] 赵瑞静, 蓝燕锐. 漏缆在自由空间和隧道中性能的对比如分析 [C]. 中国通信学会, 2011: 422-425.
[5] 林峰, 李志龙. 5G RedCap 技术的演进和应用 [J]. 移动通信, 2023(12): 49-51.

通讯作者: 李志龙、刘亚杰