



研究与开发

# 同频邻频干扰下 1.8 GHz 频段 CBTC 工作频段和布站间隔优化

许瑞琛, 詹达海, 房骥, 杜昊, 李华圣

( 国家无线电监测中心检测中心, 北京 100041 )

**摘要:** 现行基于通信的列车自动控制系统 (CBTC) 部署于 2.4 GHz 免执照频段, 易受手持 Wi-Fi 热点干扰, 已造成深圳和北京多起地铁紧急制动事故。在 1 785~1 805 MHz 频段同频邻频先用通信系统的干扰下, 为 CBTC 系统选择合适的部署频段、工作带宽和布站间隔, 提高其系统吞吐量并降低紧急制动概率十分必要。针对该问题, 首先通过分析确定干扰研究场景, 并基于确定性计算的方法得到干扰方和 CBTC 列车端之间的安全隔离, 随后通过系统级仿真比较不同条件下 CBTC 系统下行链路的吞吐量和 CBTC 系统紧急制动概率, 得到适合 CBTC 部署的工作频段、带宽和布站间隔。

**关键词:** CBTC; 干扰; 吞吐量; 紧急制动概率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017065

## Work frequency band and BS spacing optimization of CBTC in 1.8 GHz under identical and adjacent interferences

XU Ruichen, ZHAN Dahui, FANG Ji, DU Hao, LI Huasheng

The State Radio Monitoring Center Testing Center, Beijing 100041, China

**Abstract:** Communication based train control system (CBTC) is assigned in 2.4 GHz unlicensed band, and is easily interfered by Wi-Fi, which caused several emergency brake accidents in Shenzhen and Beijing. Under identical and adjacent interferences from existing systems, choose appropriate frequency band, working bandwidth and station spacing to improve throughput and emergency brake probability for CBTC system is necessary. Firstly, interference research scenarios were analyzed. Then, safety isolation between CBTC train and interferes through deterministic calculation was calculated. Afterwards, appropriate working bandwidth, frequency band and BS spacing was obtained by comparing system level simulation results, including throughput and emergency brake probability, in different conditions.

**Key words:** CBTC, interference, throughput, emergency brake probability

收稿日期: 2016-12-28; 修回日期: 2017-02-08

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (No.2013ZX03001015-003)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project of China (No.2013ZX03001015-003)



## 1 引言

基于通信的列车运行控制（communication based train control, CBTC）<sup>[1]</sup>系统能实现车地双向通信，使列车突破固定闭塞运行模式，转为移动闭塞模式，提高区间通过能力并增加车载娱乐信息服务，具有广阔的应用前景。然而，国内已部署的 CBTC 系统使用 2.4 GHz 免牌照频段，易受手持 Wi-Fi 热点干扰，已造成深圳和北京等地多起地铁紧急制动事故，造成一定的安全隐患。针对上述问题，国家无线电管理机构颁布了工业和信息化部[2015]65 号文<sup>[2]</sup>，重新发布 1 785~1 805 MHz 频段时分双工方式无线接入系统使用频率的有关事宜，允许交通（城市轨道交通等）、电力、石油等行业专用通信网和公众通信网使用 1 785~1 805 MHz 频段。工作于 1 785~1 805 MHz 频段的 CBTC 系统可以免受手持 Wi-Fi 热点的干扰，提升城市轨道交通的安全性。

如何在 1 785~1 805 MHz 频段内及邻频已有 3 种先用通信系统<sup>[3-5]</sup>的干扰下，确定合适的带宽、工作频段和布站间隔，实现 CBTC 不同服务等级的通信数据速率并降低列车紧急制动概率成为目前亟待解决的问题之一。参考文献[6-8]分别研究了采用 LTE TDD 制式 CBTC 系统的总体架构、系统功能和接口规范等内容。仅就本文所知，和 1 785~1 805 MHz 频段无线接入系统的干扰共存直接相关的研究仅有参考文献[9]。参考文献[9]使用确定性计算的方式研究了 1 785~1 805 MHz 频段无线接入系统基站和邻频 IMT 系统基站之间的干扰

共存问题，给出安全隔离度。但没有研究干扰系统对无线接入系统下行链路的干扰情况，也未针对 CBTC 场景进行研究。此外，确定性计算方法一般选取干扰最严重的链路，得到的干扰结果相对悲观，不能模拟真实场景。

因此，在分析 1 785~1 805 MHz 频段分配情况的基础上，在不同部署频段、部署带宽和布站间隔的条件下，基于分析、确定性计算和系统级仿真相结合的方法，研究同频邻频系统干扰情况下，CBTC 下行链路的吞吐量和 CBTC 系统紧急制动概率，得到适合 CBTC 系统部署的频段、带宽和布站间隔等结论。

## 2 1 785~1 805 MHz 频段频谱划分情况及干扰研究场景

本节首先分析 1 785~1 805 MHz 频段同频邻频频谱划分情况得到干扰源，随后根据干扰源和受扰源的工作环境分析得到干扰研究场景。

### 2.1 1 785~1 805 MHz 频段邻频频谱划分情况

根据参考文献[9]和参考文献[10]，国内 1.8 GHz 频段附近 IMT 频谱规划和分配情况如图 1 所示。由图 1 和参考文献[10]可知，1 785~1 805 MHz 邻频为 1 765~1 785 MHz 的 LTE FDD 上行链路和 1 805~1 820 MHz 的 GSM 下行链路。GSM 和 LTE FDD 网络覆盖面广，尤其在 CBTC 所在的城市区域部署密度较大。因此，需要研究 GSM 下行链路和 LTE FDD 上行链路对 CBTC 终端的干扰情况。

### 2.2 1 785~1 805 MHz 频段内频谱划分情况

根据参考文献[2]，1 785~1 805 MHz 频段分

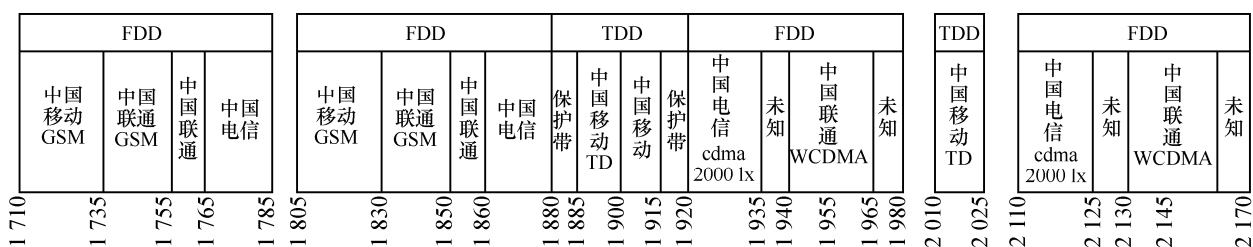


图 1 国内 1.8 GHz 附近 IMT 频谱规划和分配情况（单位：MHz）

配给城市轨道交通、电力、石油和通信等行业专网应用。目前,已部署于此频段的业务为 McWiLL 宽带无线接入系统。根据国家无线电监测中心在用台站数据库信息,工作于 1 785~1 805 MHz 频段的 McWiLL 系统已广泛应用于城区无线接入、重载铁路、油田、港口、机场等领域。所述已部署 McWiLL 系统已覆盖 1 785~1 805 MHz 整个 20 MHz 频段,单个基站带宽范围为 1~5 MHz,发射功率范围为 1~3 W,部署于地面。由于城区无线接入系统、机场等区域均有可能和 CBTC 系统运行区域重叠,因此需要研究 McWiLL 系统对 CBTC 列车端的干扰情况。

### 2.3 干扰研究场景分析

如图 2 所示,受扰 CBTC 列车端的干扰源为 LTE FDD 上行链路、GSM 下行链路和 McWiLL 系统上下行链路。因此,需要考虑 GSM 基站、McWiLL 基站、McWiLL 终端和 LTE FDD 终端对 CBTC 列车端的干扰。

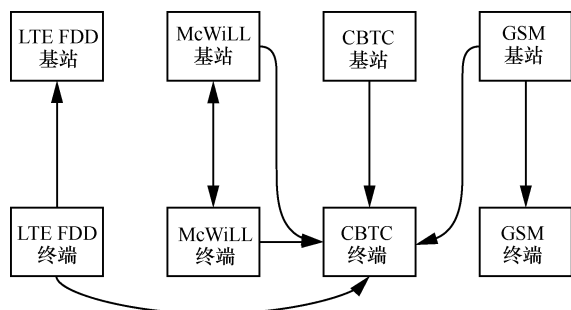


图2 CBTC列车端干扰源分析

确定干扰源后,需确定干扰共存研究场景。LTE FDD 终端和 GSM 基站可能位于地上或地下, McWiLL 基站和 McWiLL 终端位于地面环境。在地面环境,城铁终端要受到所有 4 种干扰源的干扰。在地下环境,地铁终端不会受到 McWiLL 基站和 McWiLL 终端的同频干扰。城铁终端的干扰共存环境更恶劣。因此,将 CBTC 下行链路干扰研究场景定为地面场景。后续数值计算和系统级仿真中使用的模型和参数均基于地面环境。

## 3 安全隔离和安全隔离距离确定性计算

本节首先介绍受扰方和干扰方的射频参数,随后通过计算干扰方的 ACLR 和受扰方的 ACS 得到不同情况下的 ACIR,最后根据传播模型反推得到 CBTC 列车端和干扰方的安全隔离距离。

### 3.1 受扰方和干扰方的射频参数

4 种干扰方的系统参数<sup>[9,10]</sup>见表 1。CBTC 的系统<sup>[8]</sup>射频参数见表 2。

### 3.2 ACIR 分析和计算

McWiLL 系统干扰 CBTC 系统为同频干扰。LTE FDD 和 GSM 系统对 CBTC 系统的干扰为邻频干扰。这里考虑 4 种邻频干扰情况:CBTC 系统为 5 MHz 带宽,和邻频干扰系统有 5 MHz 频谱隔离;CBTC 系统为 10 MHz 带宽,和邻频干扰系统有 5 MHz 频谱隔离;CBTC 系统为 5 MHz 带宽,和干扰系统之间紧邻频;CBTC 系统为 10 MHz 带宽,和干扰系统之间紧邻频。其中,由于 GSMK 调制特性的原因,GSM 系统和 CBTC 系统的紧邻频只有 200 kHz 的隔离带宽。本节首先介绍 ACIR 计算模型,随后通过计算 ACLR 和 ACS 最终确定不同干扰情况下的 ACIR 取值。

#### 3.2.1 ACIR 计算

ACIR 可通过式(1)得到。其中,ACLR 单位为 dB;ACS 为邻道选择性,单位为 dB。

$$ACIR = 10 \lg \left( 1 / \left( 1 / 10^{ACLR/10} + 1 / 10^{ACS/10} \right) \right) \quad (1)$$

#### 3.2.2 ACLR 计算

根据不同的频率间隔和参考文献[11]中 LTE FDD 的频谱发射模板,通过分段积分的方法得到 LTE FDD 终端泄露到 CBTC 终端的泄露功率  $P$  (mW),然后由式(2)得到不同频率间隔下的



ACLR, 具体见表 3。其中  $P_T$  为 LTE FDD 的终端 的方法得到 GSM 基站泄露到 CBTC 终端的泄露

表 1 4 种干扰方的系统射频相关参数

| 系统参数                          | GSM 基站      | LTE FDD 终端  | McWiLL 基站   | McWiLL 终端   |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 工作频段/MHz                      | 1 805~1 820 | 1 765~1 785 | 1 785~1 805 | 1 785~1 805 |
| 载波带宽/MHz                      | 0.2         | 5           | 5           | 5           |
| 最大发射功率/dBm                    | 46          | 23          | 40          | 30          |
| 热噪声密度/(dBm·Hz <sup>-1</sup> ) | -174        | -174        | -174        | -174        |
| 噪声系数/dB                       | 5           | 9           | 5           | 9           |
| 小区半径/m                        | 250         | /           | 250         | /           |
| 最大天线增益（包括馈线损耗）/dB             | 15          | 0           | 15          | 0           |
| 天线高度/m                        | 30          | 1.5         | 30          | 1.5         |

表 2 CBT C 系统射频相关参数

| 系统参数            | CBTC 基站     | CBTC 列车终端   |
|-----------------|-------------|-------------|
| 工作频段/MHz        | 1 785~1 805 | 1 785~1 805 |
| 带宽/MHz          | 5 或 10      | 5 或 10      |
| 最大发射功率/dBm      | 40 或 43     | 30 或 33     |
| 噪声系数/dB         | 5           | 9           |
| 天线增益（包括馈线损耗）/dB | 15          | 0           |
| 天线高度/m          | 20          | 5           |
| 保护准则（I/N）/dB    | -6          | -6          |
| 接收灵敏度/dBm       | /           | -93         |

表 3 不同情况下, LTE FDD 终端干扰 CBTC 终端的 ACLR

| 干扰情况    | 紧邻频/5 MHz 带宽 | 紧邻频/10 MHz 带宽 | 5 MHz 间隔/5 MHz 带宽 | 5 MHz 间隔/10 MHz 带宽 |
|---------|--------------|---------------|-------------------|--------------------|
| ACLR/dB | 21.37        | 21.19         | 35.02             | 35.02              |

发射功率, 单位为 dBm。

$$ACLR = P_T - 10 \lg P \quad (2)$$

GSM 基站干扰 LTE TDD 终端采用的 ACLR 模型如图 3 所示。

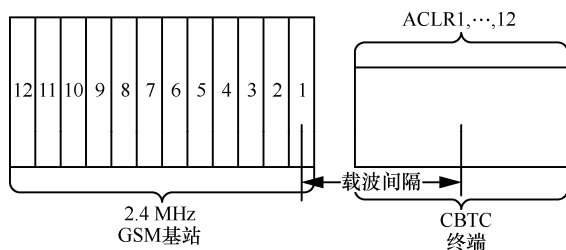


图 3 GSM 基站干扰 LTE TDD 终端的 ACLR 模型

根据参考文献[12]中 GSM 基站的频谱发射模板和参考文献[12]规定的测量带宽, 通过分段积分

功率  $P$  (mW), 代入式 (2) 得到不同情况下 GSM 基站干扰 CBTC 终端的 ACLR, 具体见表 4。

### 3.2.3 ACS 计算

CBTC 列车端属于 LTE TDD 终端。根据参考文献[11], CBTC 列车端的 ACS 可由式 (3) 得到:

$$ACS = P_{\text{Interfer}} - N - 10 \lg 10(10^{M/10} - 1) \quad (3)$$

其中,  $P_{\text{Interfer}}$  表示带内阻塞值, 单位为 dBm。  $N$  表示底噪, 单位为 dBm。  $M$  表示底噪抬升度, 单位为 dB。

由于 3GPP 研究报告中的 ACS 计算均针对同类型信号, 参考文献[11]并未给出 LTE UE 对抗 GSM 信号的 ACS 计算参数。为简便起见, 这里

表 4 不同情况下, GSM 基站干扰 CBTC 终端的 ACLR

| 干扰情况    | 200 kHz 间隔/5 MHz 带宽 | 200 kHz 间隔/10 MHz 带宽 | 5 MHz 间隔/5 MHz 带宽 | 5 MHz 间隔/10 MHz 带宽 |
|---------|---------------------|----------------------|-------------------|--------------------|
| ACLR/dB | 21.26               | 21.25                | 57.97             | 54.97              |

设 CBTC 列车端对抗 GSM 和 LTE 的 ACS 取值相同。

根据 3GPP TS36.101<sup>[11]</sup>可知, CBTC 终端和 LTE FDD 终端频率间隔在 15 MHz 以内时均属于带内阻塞。因此, CBTC 系统和 LTE FDD 隔离 5 MHz 和 10 MHz 情况下,  $P_{\text{Interfer}}$  相同,  $M$  值也相同。根据参考文献[11]可知,  $P_{\text{Interfer}}=-44$  dBm,  $M=6$  dB。CBTC 带宽为 5 MHz 时,  $N=-98.01$  dBm。CBTC 带宽为 10 MHz 时,  $N=-95$  dBm。

将上述计算参数值带入式 (3) 得到不同情况下, CBTC 列车端的 ACS, 见表 5。

### 3.2.4 ACIR 计算

将计算得到的 ACLR 和 ACS 值带入式 (1) 可得到不同情况下, 所述 4 种干扰系统干扰 CBTC 列车端的 ACIR 值, 见表 6。

### 3.3 安全隔离距离计算

安全隔离度由式 (4) 得到:

$$L_p = P_T + G_T + G_R - L_T - L_R - ACIR - I \quad (4)$$

其中,  $P_T$  表示干扰系统最大发射功率, 单位为 dBm;  $G_T$  表示干扰系统的天线增益, 单位为 dB;  $G_R$  表示受扰系统的天线增益, 单位为 dB;  $L_T$  表示干扰系统的馈线损耗, 单位为 dB;  $L_R$  表示受扰系统的馈线损耗, 单位为 dB;  $ACIR$  表示邻道干扰功率比, 单位为 dB;  $I$  表示受扰系统能承受的最大干扰信号功率, 单位为 dBm, 由受扰系统的保护准则  $I/N=-6$  dB 得到。

基站到 CBTC 终端的传播模型采用 UMTS 车

载环境模型<sup>[13]</sup>, 由式 (5) 表示。其中,  $d$  为距离, 单位为 km,  $f$  为载波频率, 单位为 MHz,  $H$  为天线高度, 单位为 m,  $h$  为基准屋顶高度, 这里设为 15 m,  $s$  为对数正态分布的均值, 这里取值为 5 dB。

$$L_p = 40 \cdot (1 - 4 \times 10^{-3} \cdot (H - h)) \lg d - 18 \lg(H - h) + 21 \cdot \lg f + 80 + s \quad (5)$$

终端到终端路径损耗采用宽带 PCS 微蜂窝模型<sup>[14]</sup>, 由式 (6) 表示。其中,  $n_1$  和  $n_2$  为路径损耗指数, 分别取值为 2.3 和 3.1,  $\lambda$  为波长,  $d$  为发射天线到接收天线的距离, 单位为 m,  $d_f$  为第一菲涅尔区距离, 单位为 m,  $s$  为发射机 1 m 的路径损耗, 通过自由空间模型获得, 单位为 dB,  $h_t$  和  $h_r$  分别表示发射机和接收机天线高度, 单位为 m。

$$L_p = \begin{cases} 10n_1 \lg d + s, & 1 < d < d_f \\ 10n_1 \lg(d/d_f) + 10n_2 \lg d_f + s, & d > d_f \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{其中, } d_f = \frac{1}{\lambda} \sqrt{16h_t^2 h_r^2 - \lambda^2 (h_t^2 + h_r^2) + \lambda^4 / 16}。$$

将表 1、表 2 和表 6 的数据带入式 (5) 和式 (6) 得到不同干扰情况下, CBTC 列车端和干扰系统之间的安全隔离度和隔离距离, 见表 7。

## 4 仿真场景设置和系统参数说明

根据表 7 可知, 根据确定性计算方法得到 GSM 基站、LTE FDD 终端、McWiLL 基站和 McWiLL 终端与 CBTC 列车端的安全隔离距离较大, 不可能在实际城铁区域内实现。例如当 CBTC 系统采用 5 MHz 带宽且和 GSM 下行链路紧邻频

表 5 不同干扰情况下的 ACS 计算结果

| 干扰情况     | GSM 干扰 CBTC      |                   | LTE FDD 干扰 CBTC  |                   |
|----------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
|          | CBTC 系统/5 MHz 带宽 | CBTC 系统/10 MHz 带宽 | CBTC 系统/5 MHz 带宽 | CBTC 系统/10 MHz 带宽 |
| ACS 值/dB | 49.26            | 46.25             | 49.26            | 46.25             |

表 6 不同干扰情况下的 ACIR 计算结果

| 隔离带宽    | 紧邻频/5 MHz 带宽 |         | 紧邻频/10 MHz 带宽 |         | 5 MHz 间隔/5 MHz 带宽 |         | 5 MHz 间隔/10 MHz 带宽 |         |
|---------|--------------|---------|---------------|---------|-------------------|---------|--------------------|---------|
|         | GSM          | LTE FDD | GSM           | LTE FDD | GSM               | LTE FDD | GSM                | LTE FDD |
| ACIR/dB | 21.25        | 21.36   | 21.23         | 21.17   | 48.71             | 34.85   | 45.70              | 34.70   |



表 7 不同干扰情况下, CBTC 列车端和干扰系统之间的安全隔离度和隔离距离

| 隔离带宽   | 邻频               |         |                   |         |                       |         |                        |         | 同频           |              |              |              |
|--------|------------------|---------|-------------------|---------|-----------------------|---------|------------------------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|        | 紧邻频/<br>5 MHz 带宽 |         | 紧邻频/<br>10 MHz 带宽 |         | 5 MHz 间隔/<br>5 MHz 带宽 |         | 5 MHz 间隔/<br>10 MHz 带宽 |         | 5 MHz        |              | 10 MHz       |              |
|        | GSM              | LTE FDD | GSM               | LTE FDD | GSM                   | LTE FDD | GSM                    | LTE FDD | McWiLL<br>基站 | McWiLL<br>终端 | McWiLL<br>基站 | McWiLL<br>终端 |
| 隔离度/dB | 137              | 102     | 134               | 100     | 111                   | 89      | 110                    | 86      | 156          | 128          | 153          | 131          |
| 距离/km  | 1.34             | 0.384   | 1.12              | 0.331   | 0.273                 | 0.146   | 0.257                  | 0.117   | 4.297        | 2.64         | 3.576        | 3.31         |

时, 安全隔离距离为 1.34 km。GSM 城区蜂窝覆盖半径为 250 m, 不符合确定性计算的到的安全隔离距离要求。第 3 节采用的确定性计算方法选取干扰最严重的链路, 取得的干扰结果和实际情况差距较大, 有必要采用系统仿真的方法通过迭代仿真过程得到系统间干扰共存的相关统计数据。本节给出仿真场景的设置和相关参数的说明。

#### 4.1 仿真分析对象、分析结论和分析方法

根据参考文献[6]和参考文献[8], CBTC 系统使用 LTE TDD 制式, 其最大发射功率、杂散等指标均已确定。需要通过研究确定其布站间隔、分配带宽和工作的具体频段。基于 LTE TDD 制式的 CBTC 系统以统计数据速率为评价标准, 其上行链路和下行链路需要支持的信息服务<sup>[7]</sup>及其优先级和所需的数据速率见表 8。此外, CBTC 系统连续 2 s 不能实现控制信号的传输会引起紧急制动。由于状态监测信号的传输是实现控制信号传输的前提条件, 列车紧急制动的充分条件为 CBTC 下行链路连续 2 s 不能实现状态监测信号和控制信号的传输。因此, 仿真分析对象为 CBTC 下行链路服务等级和连续 2 s 不能实现控制信号传输的

概率, 分析结论为 CBTC 系统分配的布站间隔、频段和带宽。

由于 1.8 GHz 频段的 CBTC 系统基于 TDD 模式, CBTC 基站通过分配时隙实现上下行链路使用同一频段。这里通过式 (7) 计算 CBTC 下行业务时隙占比值  $k$ 。将表 8 中数据带入式 (7) 得到  $k=0.526$ :

$$k = (1 - k_c) (T_D / (T_U + T_D)) \quad (7)$$

其中,  $k_c$  表示调度分配信令所占资源的比例,  $T_D$  和  $T_U$  分别表示下行链路和上行链路提供全套信息服务所需的数据速率。这里设  $k_c=0.15$ 。见表 9, 将 CBTC 下行链路无法提供任何一种信息服务定义为服务等级 0, 仅可提供状态监测服务定义为服务等级 1, 可提供状态监测服务和列车控制服务定义为服务等级 2, 可提供包括 PIS 视频传输在内所有下行信息服务定义为服务等级 3。通过 CBTC 下行链路的统计数据速率和表 9 中的判定方法得到 CBTC 下行链路可以实现的服务等级。

仿真评估条件和分析目标见表 10。由表 7 可知, CBTC 终端和 GSM 基站之间的安全隔离较大, 这里将 CBTC 系统的部署频段设置在靠近 LTE

表 8 CBT C 上行和下行链路信息服务及其优先级和最小数据速率

| 下行链路服务信息名称                     | 状态监测信号 | 控制信号 | PIS 视频业务信号 |
|--------------------------------|--------|------|------------|
| 优先级                            | 最高     | 中    | 低          |
| 最小数据速率/(kbit·s <sup>-1</sup> ) | 1      | 512  | 2 000      |
| 上行链路服务信息名称                     | 状态监测信号 | 控制信号 | IMS 视频业务信号 |
| 优先级                            | 最高     | 中    | 低          |
| 最小数据速率/(kbit·s <sup>-1</sup> ) | 32     | 512  | 1 000      |

表9 CBT C下行链路服务等级判定方法

| 服务信息名称 | 状态监测信号              | 控制信号和状态监测信号            | 控制信号、状态监测信号和 PIS 视频业务信号    |                    |
|--------|---------------------|------------------------|----------------------------|--------------------|
| 服务等级   | 0                   | 1                      | 2                          | 3                  |
| 判定方法   | [0 kbit/s,1 kbit/s) | [1 kbit/s, 513 kbit/s) | [513 kbit/s, 2 513 kbit/s) | [2 513 kbit/s, +∞) |

表10 CBTC下行链路干扰仿真条件和目标

| 序号 | 仿真条件   |         |             | 目标        |              |
|----|--------|---------|-------------|-----------|--------------|
|    | 带宽/MHz | 小区半径/m  | 部署频段/MHz    | 分析对象      | 分析结论         |
| 1  | 5      | 200~500 | 1 785~1 790 | 服务等级、制动概率 | 布站间隔、带宽、工作频段 |
| 2  | 5      | 200~500 | 1 790~1 795 |           |              |
| 3  | 10     | 200~500 | 1 785~1 795 |           |              |
| 4  | 10     | 200~500 | 1 790~1 800 |           |              |

FDD上行链路一侧。干扰系统和受扰系统的系统参数在第3.1节中给出。

## 4.2 仿真设置

本节介绍部分仿真设置和相关参数。

### (1) 射频相关参数

4种干扰方和CBTC列车端受扰方的射频参数见表1和表2。McWiLL系统工作频段保持和CBTC系统工作频段相同。

(2) 天线增益、阴影衰落、多径损耗和路径损耗

CBTC基站、McWiLL基站和GSM基站的天线增益计算方法见参考文献[13]，CBTC列车端、McWiLL终端和LTE FDD终端的天线增益设置见表1和表2。各干扰方到CBTC列车端的阴影衰落和多径损耗计算方法见参考文献[13]。

路径损耗模型设置见表11。

### (3) 功率控制设置

McWiLL下行链路和CBTC下行链路没有功

率控制功能。McWiLL上行功率控制设置见参考文献[13]，GSM下行和LTE FDD上行功率控制见参考文献[10]。

### (4) AMC设置

CBTC下行自适应调制编码设置采用香农公式修正截短形式将SINR映射为吞吐量。所述吞吐量可由式(8)得到。

$$T = \begin{cases} 0, & \eta < \eta_{\min} \\ \alpha \cdot \lg(10^{\eta/10} + 1), & \eta_{\min} < \eta < \eta_{\max} \\ T_{\max}, & \eta > \eta_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

其中， $T$ 表示吞吐量，单位为bit/(s·Hz)； $\eta$ 表示SINR，单位为dB； $\eta_{\max}$ 和 $\eta_{\min}$ 分别表示SINR上下限； $T_{\max}$ 表示吞吐量上限； $\alpha$ 为衰减因子。不同的参数设置反映不同SINR下的调制解调方式和链路条件。AMC参数设置<sup>[10]</sup>见表12。

### (5) 仿真拓扑和Wrap-Around设置

干扰仿真场景由干扰方和受扰方组成。其中GSM基站和McWiLL基站均为蜂窝结构，CBTC

表11 仿真路径损耗设置

| 距离/链路情况 | 水平距离≤100 m             |                        | 水平间距>100 m            |                         |
|---------|------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|
|         | 终端-终端                  | 基站-终端                  | 终端-终端                 | 基站-终端                   |
| 路径损耗设置  | 自由空间损耗 <sup>[14]</sup> | 自由空间损耗 <sup>[14]</sup> | PCS微蜂窝模型<br>计算方法见式(6) | UMTS车载环境模型<br>计算方法见式(5) |



表 12 AM C 参数设置

| 参数名                                                     | 取值    | 注释            |
|---------------------------------------------------------|-------|---------------|
| $\alpha$                                                | 0.6   | 衰减因子          |
| $\eta_{\min}/\text{dB}$                                 | -10   | QPSK, 1/8 码率  |
| $\eta_{\max}/\text{dB}$                                 | 22.05 | 64QAM, 4/5 码率 |
| $T_{\max}/\text{bit}\cdot(\text{s}\cdot\text{Hz})^{-1}$ | 4.4   | 64QAM, 4/5 码率 |

系统是基于蜂窝结构的线性矩形拓扑<sup>[7]</sup>。McWiLL 终端和 LTE FDD 终端随机散布于整个拓扑中。下面首先介绍 CBTC 系统拓扑,再介绍仿真场景的设置。

CBTC 系统拓扑和列车终端的 Wrap-Around 设置如图 4 所示。CBTC 系统拓扑按照实际直线轨道进行设置。可通过设置 3 个小区和 Wrap-Around 技术模拟一条无限长直线轨道上 CBTC 系统的运行情况。由图 4 可知, CBTC 系统由 3 个小区纵向连接组成。小区拓扑为截取正六边形两侧得到矩形, 单扇区角度  $120^\circ$ 。小区 ID 和扇区 ID 如图 4 所示。列车随机分布在两条平行的铁轨上。所述两条铁轨上的列车行驶方向相反, 速度相同。

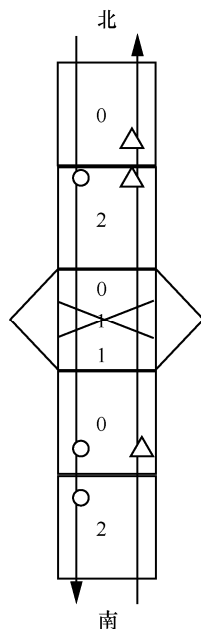


图 4 CBTC 系统仿真拓扑和 Wrap-Around 设置

图 4 也反映了仿真所采用的 Wrap-Around 技术。三角形  $\triangle$  代表由南向北行驶的列车, 圆形  $\circ$  代表由北向南行驶的列车。在  $x$  快拍间隔内, 北向行

驶列车处于第 2 小区。在  $x+1$  快拍间隔内, 当更新列车坐标时, 判断北向行驶列车已驶出拓扑区。此时, 通过将北向行驶列车变换至第 0 小区相同位置完成 Wrap-Around。同理, 南向行驶列车在驶出拓扑时, 将其坐标变至第 2 小区的相同位置。

由表 1 可知, 城区内, GSM 和 McWiLL 基站的蜂窝半径均为 250 m。为简便起见, 这里设 GSM 基站和 McWiLL 基站共址。当 CBTC 基站覆盖范围为 500 m 时, GSM 基站、McWiLL 基站、LTE FDD 终端和 McWiLL 终端干扰 CBTC 列车端的仿真场景拓扑如图 5 所示。GSM 基站和 McWiLL 基站均有 3 层共 37 个, 每个小区分为 3 个扇区, 每个扇区覆盖  $120^\circ$ 。图 5 中, 黑点代表 LTE FDD 终端或 McWiLL 终端随机分布在拓扑中, 黑色五边形表示 CBTC 列车端, 沿着铁轨南向或北向行驶。LTE FDD 终端和 McWiLL 终端的 Wrap-Around 方法见参考文献[13]。

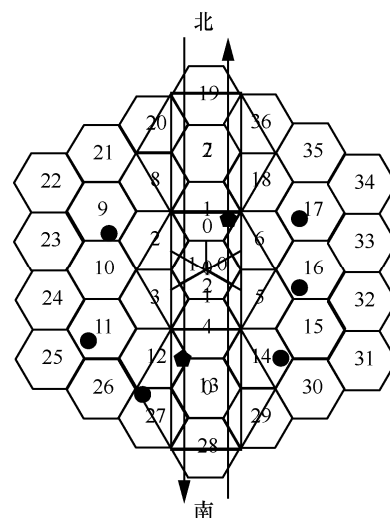


图 5 干扰仿真场景拓扑

表 13 其他仿真参数说明

| 参数名称                                          | 取值             | 注释                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CBTC 扇区中心角                                    | 90°、270°       | 每个小区 2 个扇区                                                                                                                                                                                                                                             |
| GSM/McWiLL 基站扇区中心角                            | 30°、150°和 270° | 每个小区 3 个扇区                                                                                                                                                                                                                                             |
| McWiLL 单小区内 McWiLL 终端数或 LTE FDD 终端数/个         | 20             | 实际情况中，单小区的终端数可能远大于 20 个。考虑激活率/同时在线率，为减小仿真复杂度，这里设单小区同时在线终端数为 20 个                                                                                                                                                                                       |
| CBTC 小区列车数/个                                  | 6（500 m 小区半径）  | 单 CBTC 基站最大支持 6 辆列车，单 CBTC 小区最大覆盖范围为 500 m<br>参考北京 16 号线列车数据 <sup>[7]</sup> ，列车和列车之间的最小纵向距离设为 200 m                                                                                                                                                    |
|                                               | 6（450 m 小区半径）  |                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                               | 6（400 m 小区半径）  |                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                               | 4（350 m 小区半径）  |                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                               | 4（300 m 小区半径）  |                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                               | 2（250 m 小区半径）  |                                                                                                                                                                                                                                                        |
| CBTC 列车速度/( km·h <sup>-1</sup> )              | 120            | 城区城铁最大速度为 120 km/h                                                                                                                                                                                                                                     |
| LTE FDD 终端和 McWiLL 终端速度/( m·s <sup>-1</sup> ) | 1.5            | 行人步行速度                                                                                                                                                                                                                                                 |
| CBTC 系统单 RB 带宽/ kHz                           | 375            | 参见参考文献[13]                                                                                                                                                                                                                                             |
| CBTC 基站/GSM 基站/McWiLL 基站天线倾角                  | 15°            | 参见参考文献[10]和参考文献[13]                                                                                                                                                                                                                                    |
| CBTC 基站调度方式                                   | RR             | 列车控制属于安全范畴，不适合用 PF 调度方法                                                                                                                                                                                                                                |
| McWiLL 系统上下行时隙占比                              | 1:3（上行:下行）     | TDD 机制，上下行时隙配比                                                                                                                                                                                                                                         |
| 列车和 BS 最小距离/m                                 | 5              | 两铁轨间距的 1/2                                                                                                                                                                                                                                             |
| 列车和列车之间横向最小距离/m                               | 10             | 以北京 13 号线为例，两轨之间间距为 10 m                                                                                                                                                                                                                               |
| 列车和列车之间纵向最小距离/m                               | 200            | 设安全制动距离需 200 m                                                                                                                                                                                                                                         |
| 干扰方对受扰方的 ACIR                                 | 见表 6           | 为严格起见，采用确定性计算的方式获得 ACIR。通过第 3 节的确定性计算方法，可以得到 GSM 和 CBTC 频率间隔为 10 MHz 和 15 MHz 时，GSM 基站干扰 CBTC 终端的 ACIR：<br>• 频率间隔 10 MHz，CBTC 带宽 5 MHz 时，ACIR=48.9 dB；<br>• 频率间隔 10 MHz，CBTC 带宽 10 MHz 时，ACIR=46.07 dB；<br>• 频率间隔 15 MHz，CBTC 带宽 5 MHz 时，ACIR=48.58 dB |

当 CBTC 基站覆盖范围小于 500 m 时，递减 CBTC 小区半径即可得到相应的仿真拓扑。

4.3 其他仿真参数设置

除第 4.1 节和第 4.2 节介绍的仿真设置和参数取值外，仿真中其他主要参数设置见表 13。

5 仿真结果分析

根据第 4 节中仿真的目标、分析方法和相关设置，使用 Microsoft Studio 2013 工具和 C++编程构建仿真系统，获得仿真数据后通过 MATLAB 软件进行分析。仿真分析内容主要包括如下 4 点：无干扰情况下，第 3 服务等级所需的最大布站间

隔、部署带宽及这种情况下 CBTC 系统的紧急制动概率；仅有邻频干扰情况下，第 3 服务等级所需的最大布站间隔、部署带宽和部署频段及这种情况下 CBTC 系统的紧急制动概率；同频邻频系统干扰下，第 3 服务等级所需的最大布站间隔、部署带宽和部署频段及这种情况下 CBTC 系统的紧急制动概率；在分析过程中，频率隔离指 CBTC 系统和 LTE FDD 上行链路之间的频率隔离。由于 PIS 视频可以通过缓存等手段实现连续播放，这里假设即使部分样本点的数据速率小于 2 513 kHz，只要其统计平均数据速率大于 2 513 kHz，即判断其可满足第 3 服务等级。



无干扰时,在不同的小区半径和部署带宽情况下,CBTC下行链路的数据速率如图6所示。由图6可知,列车下行链路数据速率随小区半径的增加而递减;当系统带宽为10 MHz时,500 m的小区半径仍可满足CBTC下行链路第3服务等级的需求;当系统带宽为5 MHz时,300 m的小区半径可满足CBTC下行链路第3服务等级的需求。原因分析:小区半径增加,一方面是因为部分列车和基站之间的总体损耗增加导致接收端SINR很小,另一方面会引起更多的列车终端分享频谱资源。因此,小区半径增加造成数据速率递减;因为10 MHz带宽可以提供更多的频谱资源,所以在满足第3服务等级的前提下,10 MHz带宽的CBTC系统的布站间隔更大,为 $500 \times 1.732 = 866$  m。

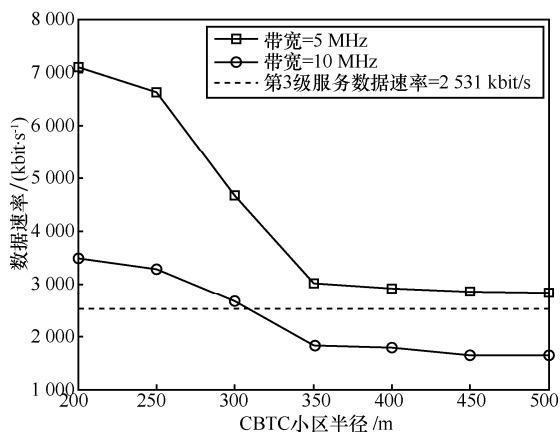


图6 无干扰情况下,CBTC下行链路数据速率样本均值

如图7所示,无干扰、小区半径为500 m且带宽为10 MHz时,CBTC下行链路数据速率集中于3 000 kbit/s附近,系统不会出现紧急制动情况,有少量样本点的数据速率能符合第3服务等级的要求。根据10组,每组3 000个样本点的仿真数据,所述情况下,紧急制动概率为0,且不能满足第3服务等级的概率为19%。因此,无干扰、带宽为10 MHz时,最经济的小区半径为500 m,布站间隔为 $500 \times 1.732 = 866$  m。

仅邻频干扰时,在不同的小区半径和工作频

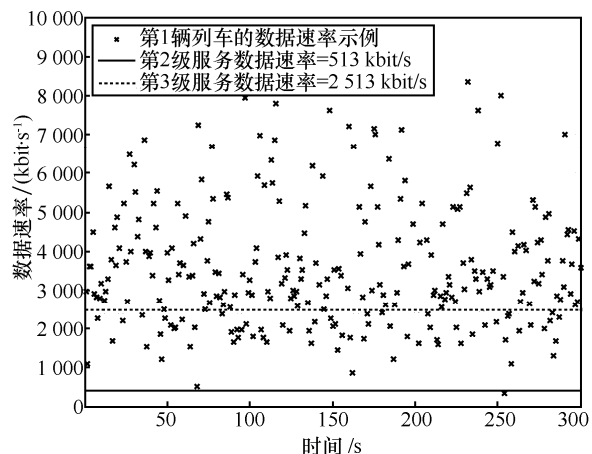


图7 无干扰、10 MHz带宽且CBTC小区半径为500 m时,CBTC系统下行链路数据速率示例

段下,CBTC下行链路的数据速率如图8所示。通过比较图6和图8可知,邻频干扰对CBTC下行链路有一定的影响,造成一定程度上的数据速率降低。例如,在无干扰和5 MHz带宽情况下,300 m的小区半径可使CBTC系统满足第3等级的服务,而在邻频干扰和5 MHz带宽情况下,300 m的小区半径并不能满足CBTC系统第3服务等级的需求。此外,同等条件时,5 MHz频率隔离下的CBTC系统下行数据速率比紧邻频情况下CBTC系统下行数据速率高210 kbit/s。原因分析:GSM基站功率较大且其小区半径为250 m,LTE FDD终端散布在整个拓扑且位置可能离列车端很近。因此,邻频干扰会对CBTC下行链路性能造成一定影响;0 MHz频率隔离情况下的LTE FDD终端ACIR要小于5 MHz频率隔离情况下LTE FDD终端的ACIR。更小的ACIR会造成泄露在CBTC工作频带内的干扰功率增加。在邻频干扰和10 MHz带宽的情况下,866 m的布站间隔可满足CBTC系统第3服务等级的需求。

如图9所示,邻频干扰、10 MHz带宽、无频率隔离且CBTC小区半径为500 m时,CBTC下行链路速率集中在2 900 kHz附近,会产生很少量连续2 s无法提供第2服务等级造成紧急制动的样本,有部分样本点的数据速率不能符合

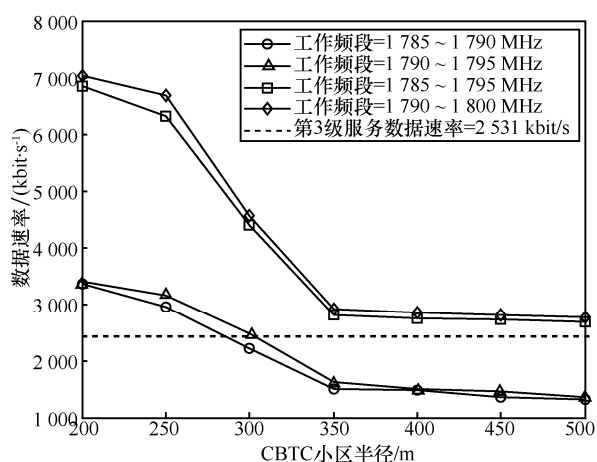


图8 邻频干扰情况下, CBTC下行链路数据速率样本均值

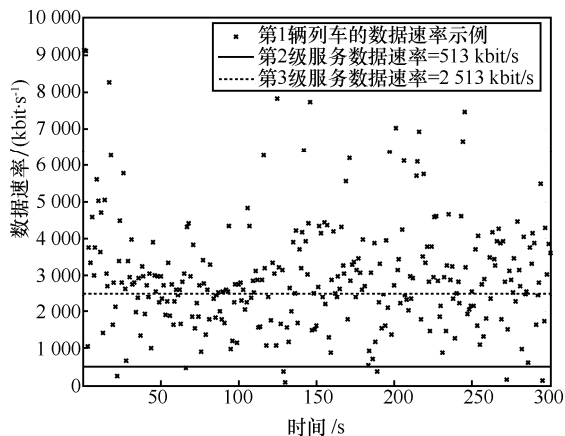


图9 邻频干扰、无频率隔离、10 MHz带宽且CBTC小区半径为500 m时, CBTC下行链路数据速率示例

第3服务等级的要求。根据10组, 每组3000个样本点的仿真数据, 所述情况下, 紧急制动概率为0.0006, 且不能满足第3服务等级的概率为32.1%。因此, 所述情况下, 最经济的布站间隔为866 m。

受到同频和邻频干扰时, 在不同的小区半径和工作频段下, CBTC下行链路的数据速率如图10所示。对比图6、图8和图10可知, McWiLL系统对CBTC下行链路的同频干扰远大于邻频系统对CBTC下行链路的干扰, 造成CBTC下行链路数据速率显著下降。例如, 10 MHz带宽和5 MHz频率隔离情况下, 250 m的小区半径可满足CBTC下行链路第3服务等级的需求。此时, 布站间隔为433 m。原因分析: McWiLL基站虽

然发射功率小于GSM基站, 但McWiLL系统和CBTC系统同频, 没有ACIR的影响, 会造成更大的干扰; McWiLL终端散布于整个拓扑, 和CBTC终端的距离可能很小, 会对CBTC下行链路造成较大的干扰。

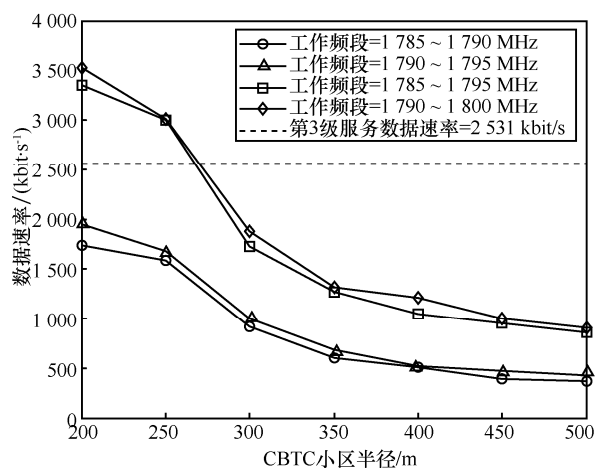


图10 同频邻频干扰下, CBTC下行链路数据速率样本均值

当CBTC下行链路工作于1785~1795 MHz且小区半径为250 m时, 同频邻频系统干扰下的列车数据速率及其可达到的服务等级示例如图11所示。由图11可知, 在同频邻频系统干扰情况下, CBTC下行链路数据速率变化较大, 均值在3100 kbit/s左右。虽然CBTC下行链路很少有连续2 s无法提供第2服务等级造成紧急制动的样本, 但有相当数量的样本无法提供第3服务等级。通过10组, 每组3000个样本点的仿真数据, 得到如下结论: 10 MHz带宽、0 MHz频率间隔和250 m小区半径的情况下, CBTC系统列车端造成紧急制动的概率为0.0043, CBTC系统列车端1 s内无法提供第3服务等级的概率为25.9%。

通过上述分析可知, 将CBTC系统部署在1.8 GHz频段是目前频谱资源紧张情况下的一种较好的选择<sup>[15]</sup>。当CBTC系统运行区域未部署McWiLL系统时, 邻频GSM下行链路和LTE FDD上行链路对CBTC下行链路的干扰较小,

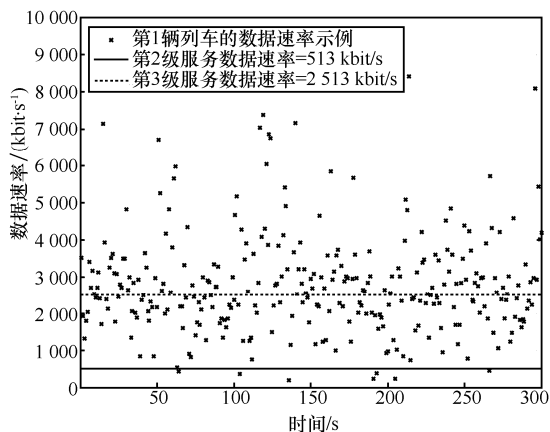


图 11 同频邻频干扰、无频率隔离、10 MHz 带宽且 CBTC 小区半径为 250 m 时, CBTC 下行链路数据速率示例

可实现 500 m 最大的 CBTC 布站间隔,能减小 CBTC 系统部署的费用。如果 CBTC 系统运行区域部署 McWill 系统, CBTC 列车端将受到比较严重的同频干扰,不仅会造成 CBTC 系统部署费用增高,还会造成约 0.43% 概率的紧急制动事故。根据参考文献[2],允许 CBTC 系统使用 1 785~1 805 MHz 共 20 MHz 的带宽。可以将布站间隔为 433 m 的 CBTC 系统部署于 1 785~1 795 MHz,并在 1 795~1 805 MHz 部署一套备份网络。这样可以使紧急制动概率小于 0.018‰,提高 CBTC 列车运行的安全度,但并不能完全避免紧急制动事故。

## 7 结束语

针对同邻频系统干扰下,1 785~1 805 MHz 频段 CBTC 系统的工作频段分配和布站间隔优化问题,首先分析国内所述频段同频邻频通信系统的部署情况并确定干扰共存研究的场景,接着使用确定性计算的方法和 ACIR 建模得到干扰系统和 CBTC 列车端的安全隔离距离。在上述研究的基础上,通过 CBTC 系统同频邻频干扰系统级仿真,分析不同布站间隔、不同带宽和不同频率间隔情况下, CBTC 下行链路的统计数据速率和对应的服务等级。最后给出布站和频率分配建议:在同频邻频干扰情况下, CBTC 布站间隔为 250 m,将 CBTC 系统部署于

1 785~1 795 MHz 且在 1 795~1 805 MHz 建立备份网络的建议,可实现第 3 服务等级和列车紧急制动概率小于 0.018‰。

## 参考文献:

- [1] WAN Y B, WANG D Q, MEI M. Composable modeling method for generic test platform for CBTC system based on the port object[J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2015, 12(6).
- [2] 工业和信息化部. 2015 年第 65 号文: 关于重新发布 1 785~1 805 MHz 频段无线接入系统频率使用事宜的通知[EB]. 2015. MIIT. [2015]No.65: notification on re-release wireless access system frequency usage in 1785~1805 MHz[EB]. 2015.
- [3] WANG C Y, WEI H Y, CHEN W T. Resource block allocation with carrier-aggregation: a strategy-proof auction design[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2016(1): 1.
- [4] CUI Y, YANG L, LIU B, et al. Multiband planar antenna for LTE/GSM/UMTS and WLAN/WiMAX handsets [J]. Let Microwaves Antennas & Propagation, 2016, 10(5): 502-506.
- [5] ZHU G F. McWill and its applications in power communication system [J]. Telecommunications for Electric Power System, 2009.
- [6] 中国城市轨道交通协会. LTE-M 终端设备技术规范[S]. 2016. Urban Rail Transit Association of China. Terminal equipment specification for LTE-M[S]. 2016.
- [7] 中国城市轨道交通协会. LTE-M 系统总体架构及系统功能规范[S]. 2016. Urban Rail Transit Association of China. General system architecture and function specification for LTE-M[S]. 2016.
- [8] 中国城市轨道交通协会. LTE-M 系统承载 CBTC 业务及接口规范[S]. 2016. Urban Rail Transit Association of China. LTE-M interface specification for CBTC[S]. 2016.
- [9] 芒戈, 刘婧迪, 方箭, 等. 1 785-1 805 MHz 频段无线接入系统与邻频 IMT 系统间干扰共存研究[S] // 2016 年中国通信标准化协会无线通信频率组第 82 次会议, 2016 年 3 月 15-17 日, 长沙. 北京: 人民邮电出版社, 2016: 201. MANG G, LIU J D, FANG J, et al. Research on interference and coexistence between radio access system in 1 785 MHz-1 805 MHz band and adjacent IMT system[C] // 2016 CCSA TC5 WG8 82th Conference, March 15-17, 2016, Changsha, China. Beijing: Posts & Telecom Press, 2016: 201.
- [10] 尹丽燕, 焦健. 900/1 800 MHz 频段 GSM 及 LTE(FDD/TDD)系统共存研究[C] // 2013 CCSA TC5 WG8 第 63 次会议,

2013 年 8 月 13–14 日, 张家界. 北京: [出版者不详], 2013.

YIN L Y, JIAO J. Research on interference and coexistence between GSM in 900/1 800 MHz band and LTE(FDD/TDD)[C]// 2013 CCSA TC5 WG8 63th Conference, August 13–14, 2013, Zhangjiajie, China. Beijing: [s.n.], 2013.

- [11] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); user equipment (UE) radio transmission and reception: TS36.101 V13.5.0(2016-09)[S/OL]. [http://www.3gpp.org/Dyna\\_Report/36-series.htm](http://www.3gpp.org/Dyna_Report/36-series.htm). 2016.
- [12] 3GPP. GSM/EDGE radio transmission and reception: TS45.005 V13.2.1(2016-09)[S/OL]. [http://www.3gpp.org/Dyna\\_Report/45-series.htm](http://www.3gpp.org/Dyna_Report/45-series.htm). 2016.
- [13] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); radio frequency (RF) system scenarios: TR36.942 V13.0.0 (2016-01)[S/OL]. <http://www.3gpp.org/DynaReport/36-series.htm>. 2016.
- [14] 国家无线电监测中心检测中心. 1.8 GHz CBTC 下行通信性能评估系统[Z]. 2016.  
CBTC. Downlink communication performance evaluation system in 1.8GHz[Z]. 2016.

#### [作者简介]



许瑞琛 (1984–), 男, 博士, 国家无线电监测中心检测中心工程师, 主要研究方向为无线通信、频谱分配和干扰共存理论。



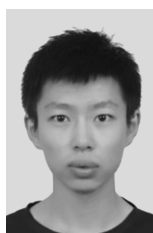
詹达海 (1982–), 男, 国家无线电监测中心检测中心工程师, 主要研究方向为无线电发射设备检测理论、5G 通信新技术。



房骥 (1984–), 男, 博士, 国家无线电监测中心检测中心工程师, 主要研究方向为无线通信、软件无线电。



杜昊 (1985–), 男, 国家无线电监测中心检测中心工程师, 主要研究方向为 OTA 测试理论、工业物联网。



李华圣 (1987–), 男, 国家无线电监测中心检测中心工程师, 主要研究方向为无线供电理论、LTE-V2X。