



基于时延差异性约束的 LTE-R 系统频谱需求预测

刘鹏¹, 李伟², 刘斌², 王坦², 耿绥燕¹

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 国家无线电监测中心, 北京 100037)

摘要: 为了科学地规划和分配 LTE-R 的用频, 需要对其频谱需求总量做出合理预测。在深入分析 ITU-R M.1768 方法的基础上, 提出了一种基于时延差异性约束的 LTE-R 系统频谱需求预测方法。该方法定义了 9 种服务类别和 9 种服务环境, 推导给出了 LTE-R 系统业务量的计算表达式, 在业务时延差异性约束条件下利用 M/G/1 排队模型对我国 LTE-R 系统的频谱需求进行了初步预测。研究结果表明, 我国 LTE-R 系统上行和下行频谱需求不对称, 且可能的范围分别是 14~15 MHz 和 5~6 MHz, 若不考虑未来新增的视频业务量, 目前分配给 GSM-R 系统的频谱资源即可满足其带宽需求。此外, 分析了 LTE-R 网络实际承载层面的工程频率效率和基于高带宽的视频业务量对 LTE-R 频谱带宽需求总量的影响。该研究为我国下一代铁路移动通信系统的频率规划提供了技术支撑。

关键词: LTE-R; 频谱需求; 频率规划; ITU-R M.1768

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017330

Spectrum demand prediction of LTE-R system based on delay difference constraint

LIU Peng¹, LI Wei², LIU Bin², WANG Tan², GENG Suiyan¹

1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China

2. State Radio Regulatory Commission, Beijing 100037, China

Abstract: In order to plan and allocate the spectrum resources of LTE-R scientifically, it is necessary to make reasonable forecast of total spectrum demand for LTE-R. After deep analysis of ITU-R M.1768 method, a spectrum demand forecasting method based on different delay constraints for LTE-R system was provided. This method defined nine kinds of service categories, nine kinds of service environments, and derived the expression of LTE-R system traffic. Under different delay constraints condition of different services, the M/G/1 queuing model was used to analyze the spectrum requirements of LTE-R system preliminarily. The results show that the uplink and downlink spectrum demand of China's LTE-R system is asymmetric and the possible range is 14~15 MHz uplink and 5~6 MHz downlink, respectively. If new video traffic in the future is not considered, the current spectrum resources distributed to GSM-R system spectrum can meet the bandwidth requirements of LTE-R system. In addition, the influence of engineering frequency efficiency of LTE-R network and high-bandwidth video traffic on LTE-R spectrum total bandwidth demand was analyzed. This study provides technical support for the frequency planning of China's next generation railway mobile communication system.

Key words: LTE-R, spectrum demand, frequency planning, ITU-R M.1768

收稿日期: 2017-08-08; 修回日期: 2017-12-08

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (No. 2015ZX03002008)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project of China (No. 2015ZX03002008)

1 引言

近10年来,我国高速铁路及相关产业飞速发展。截至2016年9月,中国已经开通高速铁路超过20 000 km。“十三五”期间,我国还将继续建设10 000 km以上的高速铁路,到2025年我国高速铁路总长度将达到38 000 km^[1]。除传统的语音业务、列控业务和调度业务外,未来铁路移动通信系统还将提供高清视频监控、铁路多媒体调度视频与铁路物联网等更多宽带业务^[2],然而,目前我国铁路部门运营的GSM-R(GSM-railway)网络的系统带宽窄、业务承载能力有限、频谱利用率低,难以承载视频监控等对带宽需求较高的业务^[3],新业务产生的海量移动业务流量将可能产生一定的频谱需求缺口。为了应对日益增长的铁路业务量,保证铁路旅客安全,提供实时多媒体信息,我国铁路部门决定采用频谱使用效率更高的LTE-R(LTE-railway)系统作为下一代铁路移动通信系统^[4,5]。为了满足LTE-R系统的用频需求,实现频谱资源的科学分配和使用,避免超前分配导致的资源浪费,需要对其频谱需求总量做出合理预测,以支撑后续频谱规划与分配工作。

目前关于LTE-R系统频谱需求研究的文献报道较少,大多数的频谱需求研究成果主要针对IMT系统,其预测方法也较为成熟^[6-10]。参考文献[6]提出了一种用于IMT-2000系统的频谱需求预测方法,该方法利用了爱尔兰-B和爱尔兰-C公式对系统频谱需求带宽进行了测算。参考文献[7]在统计调研未来IMT系统业务量的基础上,提出了一种用于多制式IMT系统并存情形下的频谱需求预测方法。参考文献[8]针对IMT-2000和超IMT-2000系统卫星部分在1~6 GHz频段的频谱需求,提出了一种基于用户数量预测与用户业务量预测的频谱需求预测方法。参考文献[9]考虑了高速率业务对业务量的影响,利用参考文献[8]的方法给出了卫星移动业务在4~16 GHz频段的频谱

需求结果。参考文献[10]分别在ITU-R M.1390建议书提供的频谱需求预测方法与PPDR网络用户终端信干噪比(SINR)建模仿真的基础上,结合公共保护与赈灾系统场景特征和用户分布特点,提出了面向窄带、宽带、超宽带系统的频谱需求预测方法。参考文献[11]提出了一种基于IMT-2020系统关键性能指标(key performance indicator, KPI)的频谱需求预测方法,结合映射到不同部署环境下(办公室、密集住宅区等)的关键性能指标(峰值数据速率、用户体验速率、区域系统容量等),通过不同场景下的频谱效率,可以分别计算得到IMT-2020系统6 GHz以上与6 GHz以下的频谱需求。考虑到LTE-R系统中列车的高速移动性和业务的可靠性等特殊要求^[2,3],以上方法均无法直接应用于LTE-R系统的频谱需求预测。

2015年底,国际电信联盟(ITU)于世界无线电通信大会WRC-15期间确立了WRC-19 1.11议题,启动了下一代铁路移动通信系统的频谱需求研究^[13]。截至目前,国际电信联盟相关研究工作主要集中在铁路移动通信系统的一般架构、部署场景、主要应用与相关技术等方面,关于频谱需求尚未输出任何研究结果。

基于以上分析,本文以ITU-R M.1768方法为基础,提出了一种基于时延差异性约束的LTE-R系统频谱需求预测方法。相比面向公众移动通信系统的ITU-R M.1768方法,该方法主要针对铁路下一代专用无线通信系统LTE-R进行频谱需求预测,在综合分析LTE-R系统的业务特征、应用场景以及服务质量要求的基础上,对LTE-R系统的服务类别和服务环境进行了定义,推导给出了LTE-R系统业务量的封闭表达式,在业务时延差异性约束条件下利用M/G/1排队模型初步预测了我国LTE-R系统的频谱需求,并对LTE-R系统工程频谱效率与视频业务对预测结果的影响进行了分析。



2 基于时延差异性约束的 LTE-R 频谱需求测算原理

2.1 ITU-R M.1768 方法介绍

ITU-R 在 M.1768 建议书中提出的面向 IMT 系统频谱需求的预测方法是一套针对全球范围内的预测方法^[7,13], 主要用于同时存在多种制式的 IMT 系统的频谱需求计算。该方法综合考虑了服务类别 (service category)、服务环境 (service environment)、无线电环境 (radio environment)、无线接入技术组 (radio access technology group) 的影响, 具体包括 6 个步骤: 关键参数定义、业务应用与市场需求调查统计、业务量计算与分配、系统容量计算、频谱需求计算以及频谱需求整合。

步骤 1 定义服务类别、服务环境、无线电环境、无线接入技术组。业务方面, M.1768 方法共包含 20 种服务类别、6 种服务环境和 4 种无线电环境; 技术方面, M.1768 方法包含 4 种无线接入技术组。

步骤 2 调查统计 IMT 系统的业务应用及相关参数, 并将不同服务环境下的业务应用划分归类到步骤 1 定义的 20 种服务类别之中。

步骤 3 计算每种服务环境下每一个服务类别的业务量需求, 基于电路交换与分组交换的业务量需求应分开计算。由于每种服务环境都可以被一种或多种 RATG 支持, 且每种 RATG 下存在多种无线电环境 (如宏蜂窝、微蜂窝等), 因此需将不同服务环境下每一个服务类别的业务量分配到各 RATG 的无线电环境当中。

步骤 4 考虑不同服务类别的 QoS 要求, 结合步骤 3 得到的基于电路交换与分组交换的业务量, 计算不同 RATG 下不同无线电环境的系统容量。

步骤 5 利用步骤 4 得到的系统容量与不同 RATG 下每种无线电环境的频谱效率, 计算得到不同 RATG 下不同无线电环境的频谱需求。

步骤 6 考虑到相同 RATG 下不同无线电环

境频率复用和系统部署带宽等因素, 合并调整得到每个 RATG 在不同服务环境下的频谱需求, 将相同电信密度下每个 RATG 的频谱需求加和之后再取最大值, 即该 RATG 的最终频谱需求, 最后将不同 RATG 的频谱需求相加得到 IMT 系统的总频谱需求。

2.2 LTE-R 系统频谱需求测算原理

针对 LTE-R 系统, 本文以 M.1768 方法为基础, 提出了一种基于时延差异性约束的频谱需求预测方法。该方法综合考虑了 LTE-R 系统所承载业务的安全级别、数据速率和时延要求以及 LTE-R 系统的应用场景, 重点对不同时延约束限制下的业务应用进行了频谱预测分析, 具体分为以下 5 个步骤。

步骤 1 定义 LTE-R 系统的服务类别 (SC)、服务环境 (SE)、无线电环境 (RE) 与无线接入技术组 (RATG)。

经调研分析, 相比于 GSM-R 系统, LTE-R 系统将提供更为丰富的服务应用, 细分为 33 种行车相关业务、9 种运营维护业务、2 种公共安全业务与旅客信息共 45 种业务^[14]。根据 LTE-R 系统对可靠性 (时延) 与安全性的要求, 将 45 种业务划分为会话类业务 (含语音视频) 与数据类业务两类。会话类业务包括语音业务与语音视频业务, 其中与调车有关的语音业务定义为 I 类会话业务, 无关的定义为 II 类会话业务; 语音视频业务指实时的对话视频流, 对于保证比特率 (GBR) 的语音视频业务定义为 I 类, 不保证比特率 (non-GBR) 的语音视频业务定义为 II 类。安全类数据业务是指与列控相关的数据业务, 非安全类数据业务是指除非会话类业务之外且与列控无关的数据业务。根据 LTE-R 系统对服务应用的数据速率要求, 将 45 种业务的数据速率划分为低速数据速率 (<16 kbit/s)、中速数据速率 (<144 kbit/s)、高速数据速率 (<2 Mbit/s) 3 个等级。按照上述的二维分类原则, LTE-R 系统的 45 种业务可归类得

到 9 种服务类别^[14-16]，具体见表 1。

表 1 LTE-R 服务类别分类

业务特征		速率等级		
		低速数据	中速数据	高速数据
会话类	I 类	—	SC1	SC7
	II 类	—	SC2	SC8
数据类	安全类	SC3	SC4	—
	非安全类	SC5	SC6	—
		—	—	SC9

LTE-R 系统的应用场景可划分为“线”和“点”两大类型^[4,14]，“线”主要包括：300 km/h 及以上等级线路、200 km/h 以下客货混跑线路、重载铁路。“点”主要包括：车站（中间站）、大型客运站、编组站和线路区间。每种场景承担的角色和功能不同，其承载的应用业务也不尽相同，应用业务占用带宽的需求也不同。根据各“点”下各“线”实际部署情况，LTE-R 系统的服务环境可以分为 9 类，具体见表 2。

表 2 LTE-R 系统服务环境分类

SE	车站	区间	编组站	大型客运站
重载铁路	SE1	SE4	SE7	—
200 km/h 以下铁路	SE2	SE5	SE8	SE9
300 km/h 以上铁路	SE3	SE6	—	

LTE-R 系统作为铁路运营部门的专用无线网络，将承载列车调度、列车控制、视频监控、列车定位等全部无线业务，是未来铁路部门唯一的无线接入技术组。因此，LTE-R 系统将承担铁路部门所有的无线业务流量。此外，列车高速行驶状态下，基站间距离很短，会导致十分频繁的越区切换，增加通信时延，使列车通信质量下降，同时，也增加了系统的部署成本，因此，LTE-R 系统将延续 GSM-R 系统采用宏基站的部署方式。

步骤 2 分析统计 LTE-R 系统用于业务量和系统容量计算的每种业务的特征参数，具体包括用户密度 U 、进程到达率 Q 、平均进程持续时间 μ 、平均服务比特率 r 、平均分组长度 s 、分组长度的二阶矩 $s^{(2)}$ 以及平均分组时延 D 。与 LTE-R 系统容

量计算相关的具体参数见表 3^[13-17]。

表 3 与 LTE-R 系统容量计算相关的具体参数

SC	平均分组长度 (/bit·s ⁻¹ ·packet ⁻¹)	分组长度的 二阶矩 (/bit·s ⁻² ·packet ⁻¹)	允许的平均 分组时延/ms
SC1	820.48	1 108 765.92	100
SC2	820.48	1 108 765.92	150
SC3	380.88	288 155.12	100
SC4	820.48	1 108 765.92	100
SC5	380.88	288 155.12	300
SC6	820.48	1 108 765.92	300
SC7	8 172.80	52 739 432.56	100
SC8	8 172.80	52 739 432.56	150
SC9	10 954.64	92 189 866.64	300

步骤 3 依据步骤 2 中分析统计得到的特征参数，计算 LTE-R 系统在不同服务环境下每种服务类别的业务量。

LTE-R 系统为全 IP 网络^[17]，全部采用分组交换技术，业务量计算式为^[7]：

$$T_{d,t,n,RATG,p} = \sum_{m \in d} P'_{m,t,n,RATG,p} \mu_{m,t,n} r_{m,t,n} \quad (1)$$

式 (1) 表示在时间间隔 t 内，在电信密度 d 的环境中，无线电接入技术组 RATG 的一个无线电环境 p 的服务小区中服务类别 n 的业务量。其中 $\mu_{m,t,n}$ 、 $r_{m,t,n}$ 分别表示属于电信密度 d 的服务环境 m 中，服务类别 n 在时间间隔 t 内的平均进程持续时间和平均服务比特率。式 (1) 中 $P'_{m,t,n,RATG,p}$ 可表示为：

$$P'_{m,t,n,RATG,p} = \xi_{m,t,n,RATG,p} U_{m,t,n} Q_{m,t,n} A_{d,p} \quad (2)$$

其中， $\xi_{m,t,n,RATG,p}$ 表示在时间间隔 t 内的服务环境 m 中，服务类别 n 的业务量分配到无线电接入技术组 RATG 的无线电环境 p 中的分配比率， $U_{m,t,n}$ 、 $Q_{m,t,n}$ 分别表示在服务环境 m 中，服务类别 n 在时间间隔 t 内的用户密度与进程到达率， $A_{d,p}$ 表示电信密度 d 下无线电环境 p 的服务小区面积。

由于 LTE-R 系统承载铁路运营部门的全部无



线业务量,且LTE-R系统部署的站点类型仅为宏基站,同时频谱需求预测只考虑忙时的无线业务量,因此式(2)中的分配比率 $\xi_{m,t,n,RATG,p}$ 为1,将式(2)代入式(1),整理可得LTE-R系统在服务环境 m 下承载的服务类别 n 的业务量计算式可表示为:

$$\begin{aligned} T_{m,n,LTE-R,macro} &= U_{m,n} Q_{m,n} A_{d,macro} \mu_{m,n} r_{m,n} \\ &= U_{m,n} Q_{m,n} A_{d,macro} \mu_{m,n} \sum_{s \in n} \frac{U_{m,s} Q_{m,s} \mu_{m,s}}{U_{m,n} Q_{m,n} \mu_{m,n}} r_{m,s} \quad (3) \\ &= A_{d,macro} \sum_{s \in n} U_{m,s} Q_{m,s} \mu_{m,s} r_{m,s} \end{aligned}$$

其中, $U_{m,s}$ 、 $Q_{m,s}$ 、 $\mu_{m,s}$ 、 $r_{m,s}$ 分别表示服务环境 m 下属于服务类别 n 的业务 s 的用户密度、进程到达率、平均进程持续时间与平均服务比特率,业务 s 取自步骤1中的45种铁路无线电业务。

步骤4 根据步骤2中分析统计得到的特征参数与步骤3中计算得到的业务量,利用M/G/1排队模型,计算时延差异性约束条件下LTE-R系统在每种服务环境下需要的系统容量。服务类别 n 的平均分组时延由平均呼叫等待时间与平均呼叫服务时间两部分组成,平均呼叫等待时间 W_n 包括3个部分,计算式为:

$$W_n = W_0 + \sum_{i=1}^N b_i (L_{i,n} + M_{i,n}), 1 \leq n \leq N \quad (4)$$

其中, W_0 表示新呼叫到达时,正在被服务的呼叫产生的时延, b_i 表示服务类别 i 的平均呼叫服务时间, N 表示系统中的服务类别总数, $L_{i,n}$ 表示新呼叫到达时,等待序列中先于该呼叫被服务的平均呼叫数量, $M_{i,n}$ 表示新呼叫排队等待时,到达系统且先于该呼叫被服务的平均呼叫数量。步骤1定义的服务类别中,编号越大,优先级越低,编号越小,优先级越高。不同等级业务同时到达时,LTE-R系统优先服务高优先级业务,低优先级业务排队等待。 W_0 、 $L_{i,n}$ 、 $M_{i,n}$ 计算方法分别如下所示^[18]:

$$W_0 = (1 - \sum_{i=1}^N \rho_i) \cdot 0 + \sum_{i=1}^N \rho_i \cdot \frac{b_i^{(2)}}{2b_i} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \lambda_i b_i^{(2)} \quad (5)$$

$$L_{i,n} = \lambda_i W_i, 1 \leq i \leq n \quad (6)$$

$$M_{i,n} = \lambda_i W_n, 1 \leq i \leq n-1 \quad (7)$$

将式(5)~式(7)代入式(4)后,迭代求解可得到服务类别 n 的平均呼叫等待时间 W_n :

$$W_n = \frac{W_0}{\left(1 - \sum_{i=1}^{n-1} \rho_i\right) \left(1 - \sum_{i=1}^n \rho_i\right)} = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i b_i^{(2)}}{2 \left(1 - \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i b_i\right) \left(1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i b_i\right)}, 1 \leq n \leq N \quad (8)$$

服务类别 n 的平均呼叫服务时间利用平均分组长度除以系统容量计算得到,因此服务类别 n 的平均分组时延由式(9)给出:

$$D_n(C) = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i s_i^{(2)}}{2(C - \sum_{i=1}^n \lambda_i s_i)(C - \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i s_i)} + \frac{s_n}{C} \quad (9)$$

其中, λ_i 表示业务类别 n 的IP分组到达率, $\lambda_i = \frac{T_i}{s_i}$, s_i 、 $s_i^{(2)}$ 表示业务类别 i 的IP分组长度分布的平均值与二阶矩。对式(9)进行变换,得到一个三元一次方程:

$$a_n x^3 + b_n x^2 + c_n x + d_n = 0$$

$$a_n = 2D_n$$

$$b_n = 2(D_n (\sum_{i=1}^n \lambda_i s_i + \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i s_i) + s_n)$$

$$c_n = 2(D_n (\sum_{i=1}^n \lambda_i s_i) (\sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i s_i) + s_n (\sum_{i=1}^n \lambda_i s_i + \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i s_i)) - \sum_{i=1}^N \lambda_i s_i^{(2)}$$

$$d_n = -2s_n (\sum_{i=1}^n \lambda_i s_i) (\sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i s_i)$$

(10)

式(10)的解 x 即式(9)中满足服务类别 n 时延约束条件下的系统总容量 C_n ,并且取3个解中大于同一服务环境下所有服务类别业务量之和的解为该类别所求系统容量。若系统总容量最大的服务类别的时延约束条件能够满足,则其他服务类别的时延约束条件也能够满足,所以,取不同服务类别下系统容量的最大值即该服务环境下最终的系统容量。

步骤5 利用步骤4中得到的系统总容量计算各服务环境下的频谱需求,取最大值作为

LTE-R 系统的总频谱需求。

对于 LTE-R 系统, 不同服务环境下的频谱需求量 F_m 可以按照式 (11) 求得。其中, 脚注 m 代表服务环境 SE, C_m 表示平均分组时延受限情形下 LTE-R 系统在服务环境 m 中的系统容量, E_m 表示服务环境 m 下 LTE-R 系统的频谱效率:

$$F_m = \frac{C_m}{E_m} \quad (m = 1, 2, \dots, 9) \quad (11)$$

在同一场景 (车站、区间、编组站、大型客站) 下, 取不同线路频谱需求最大值为该场景的频谱需求, 车站、区间、编组站与大型客站在空间上互不重叠, 取以上各场景中最大的频谱需求作为 LTE-R 系统的总频谱需求, 因此, LTE-R 系统最终的频谱需求可表示为:

$$F = \max \{ \max \{ F_{SE1}, F_{SE2}, F_{SE3} \}, \max \{ F_{SE4}, F_{SE5}, F_{SE6} \}, \max \{ F_{SE7}, F_{SE8} \}, F_{SE9} \} \quad (12)$$

在实际部署中, 由于受系统部署带宽的约束, 需要对式 (12) 的计算结果做出如下修正:

$$F_{LTE-R} = \left\lceil \frac{F}{B} \right\rceil \cdot B \quad (13)$$

其中, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整, B 表示系统部署带宽。

3 LTE-R 系统的频谱需求预测

较 GSM-R 系统而言, LTE-R 系统将提供 45 种业务, 依据 LTE-R 系统每种业务的速率等级和特

征, 将这 45 种业务划分为 9 类服务类别 SC (见表 1), 根据各“点”下各“线”的场景划分方法, 将 LTE-R 系统的场景划分为 9 种服务环境 SE (见表 2), 通过统计分析得到 45 种业务在 9 种服务环境下的用户密度、进程到达率、平均进程持续时间和平均服务比特率, 利用式 (3) 分别计算得到 9 类服务环境下不同服务类别的上下行业务量, 所得结果见表 4 和表 5。

根据表 3 中不同 SC 的平均分组长度和分组长度的二阶矩以及表 4 和表 5 中的上下行业务量, 利用式 (10) 分别计算 LTE-R 系统在平均分组时延受限情况下的上下行容量, 不同服务环境 SE 下的计算结果见表 6。

结合表 6 中的系统容量结果, LTE-R 系统在不同服务环境下的频谱需求量 F_m 可以按照式 (11) 求得。由于受通信环境与列车速度等因素的影响, LTE-R 系统在不同服务环境下的频谱效率会有所不同。依据中兴通讯公司实测所得的 LTE-R 系统上下行频谱效率 (见表 7) [19], LTE-R 在各服务环境下的频谱需求计算结果如图 1 所示。

利用式 (12) 计算得到 LTE-R 系统的上行频谱需求为 12.69 MHz, 下行频谱需求为 4.21 MHz。利用式 (13) 对上述结果进行调整, LTE-R 系统支持多种部署带宽, 分别取部署带宽为 1.4 MHz、3 MHz、5 MHz, 对计算结果进行修正得到 LTE-R 系统的频谱需求结果见表 8。

表 4 LTE-R 系统 9 类 SE 下 SC 的上行业务量 (Mbit/s)

SC	SE1	SE2	SE3	SE4	SE5	SE6	SE7	SE8	SE9
SC1	0.012	0.006 3	0.013 5	0.004 5	0.009 375	0.03	0.018	0.371 875	0.016 875
SC2	0.053 813	0.003 15	0.006 75	0	0	0.022 5	0.077 438	0.194 531	0.028 125
SC3	0.005 447	0.000 77	0.000 478	0.001 556	0.000 313	0.000 641	0.008 947	0.006 211	0.001 101
SC4	0.013 125	0	0	0.003 75	0	0.062 5	0.056 875	0.203 125	0
SC5	0.007 366	0.030 69	0.070 453	0.000 769	0.002 578	0.037 578	0.025 703	0.068 848	0.168 359
SC6	1.116 5	1.396 5	1.687 5	0	0	0.790 625	2.206 75	6.158 59	7.078 5
SC7	1.344	3.36	7.2	0	0	8.2	4.099 2	9.72	9
SC8	0.336	0.201 6	0.432	0.144	0.3	0.96	0.504	1.5	0.54
SC9	2.562	0.201 6	0.432	0	0	1.44	2.562	4.575	0.54



表 5 LTE-R 系统 9 类 SE 下 SC 的下行业务量 (Mbit/s)

SC	SE1	SE2	SE3	SE4	SE5	SE6	SE7	SE8	SE9
SC1	0.072	0.045	0.013 5	0.004 5	0.009 375	0.045	0.102 5	0.371	0.016 8
SC2	0.018	0	0	0	0	0.022 5	0.110 625	0.195	0
SC3	0.050	0.114	0.017 1	0.001 51	0.000 23	0.051	0.022 5	0.024 7	0.035 3
SC4	0.075	0	0	0.003 75	0	0.062 5	0.031 25	0	0
SC5	0.12	0.518 75	0.098 4	0.000 75	0.002 5	0.046 7	0.203	0.447	0.352
SC6	0.012	0.015	0.679 5	0.000 6	0.001 25	0.077 5	0.547	1.025	1.887 5
SC7	0	0	0	0	0	0	3.456	4.32	0
SC8	2.304	1.44	0.432	0.144	0.3	0.96	0.72	1.5	0.54
SC9	0	4.8	2.88	0	1.2	1.2	0	0	6

表 6 平均分组时延受限条件下 LTE-R 系统的上下行容量 (Mbit/s)

系统容量	SE1	SE2	SE3	SE4	SE5	SE6	SE7	SE8	SE9
上行	5.47	5.33	9.99	0.19	0.37	11.62	9.59	22.84	17.54
下行	2.80	4.54	4.13	0.19	1.53	2.49	3.63	5.92	8.84

表 7 LTE-R 系统频谱效率/(bit/(s·Hz))

SE	车站		区间		编组站		大型客站	
	上行	下行	上行	下行	上行	下行	上行	下行
重载铁路	1.8	2.1	1.2	1.9	1.8	2.25	—	—
200 km/h 以下铁路	1.8	2.1	1.2	1.9	1.8	2.25	1.8	2.1
300 km/h 以上铁路	1.8	2.1	1.1	1.8	—	—	—	—

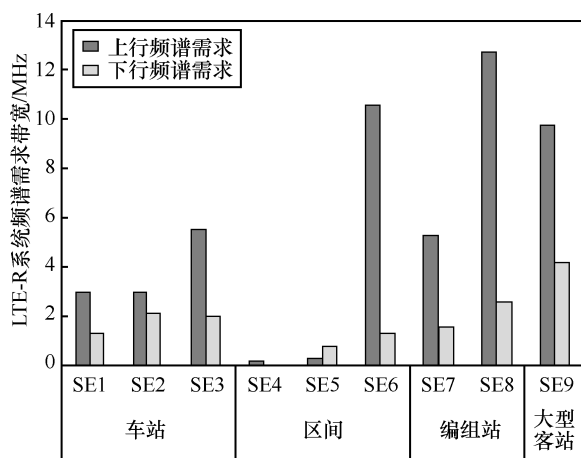


图 1 LTE-R 在各服务环境下的频谱需求计算结果

表 8 LTE-R 系统上下行频谱需求带宽 (MHz)

频谱需求	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz
上行	14	15	15
下行	5.6	6	5

4 关键因素对测算结果的影响分析

4.1 工程频谱效率的影响分析

频谱效率与频谱需求总量约成反比例关系，它表征单个基站承载业务吞吐量的能力。在实际网络运行过程中，由于受设备满负荷运转、用户在信号远中近点随机分布、基站覆盖局限性的影响，LTE-R 网络实际承载层面的频谱效率是在一定范围内波动的，即“工程频谱效率”。下面以普速编组站场景为例分析工程频谱效率对频谱需求结果的影响，在该场景中，LTE-R 上行频谱效率范围为 1.4~4 bit/(s·Hz)，LTE-R 下行频谱效率为 2~4 bit/(s·Hz)^[19,20]，根据表 4、表 5，利用式 (10) 计算得到不考虑视频业务时的上行系统容量为 7.00 Mbit/s，下行系统容量为 2.06 Mbit/s，根据式 (11) 可得，LTE-R 在普速编组站场景下的频谱需求结

果,具体如图2所示,图2中4 MHz为目前分配给 GSM-R 系统的上行/下行频谱带宽。

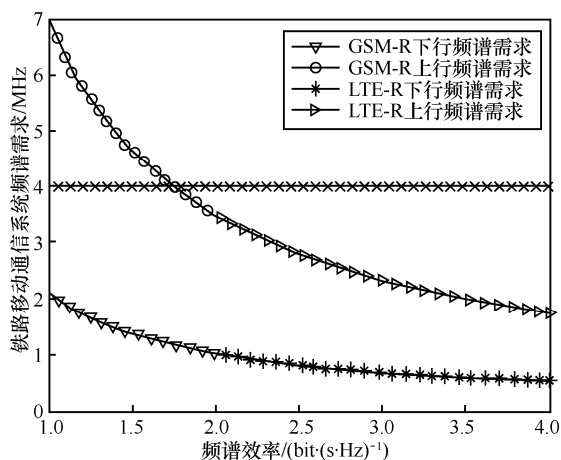


图2 频谱效率对铁路移动通信系统频谱需求的影响

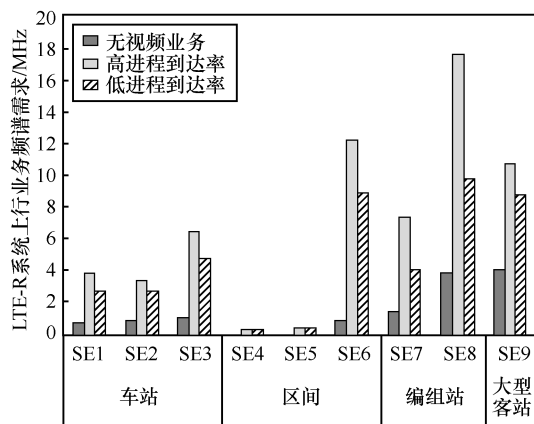
通过图2可以看出,在LTE-R系统业务量、平均分组长度、时延要求等参数不改变的前提下,LTE-R系统的频谱需求总量随工程频谱效率的增加呈逐步下降的趋势。在系统容量相同的前提下,对比GSM-R和LTE-R的频谱需求总量可知,系统升级提高了频谱效率,从而带来了更多的频谱红利。

4.2 引入视频业务的影响分析

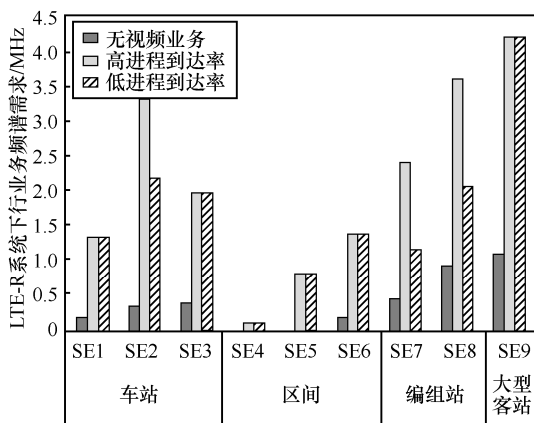
LTE-R系统的视频业务主要有机车自动视频监控(AVDR)、特殊区域线路视频监控、调机视频监控、作业视频监控、列车安全视频监控和道岔缺口视频监控等业务,这些视频业务作为LTE-R系统铁路移动通信业务量的主要增长点,将会大幅增加未来铁路移动通信系统的频谱带宽需求。视频业务的业务量受其进程到达率、平均进程持续时间等因素的影响,本文主要考虑其平

均进程到达率对频谱需求的影响。不同服务环境下视频业务的业务种类以及进程到达率会有所差别,表9中给出了普速编组站场景下这些视频业务高进程到达率与低进程到达率的取值。

在视频业务进程到达率变化但其他参数不变的情况下,按照式(3)~式(12)计算,得到LTE-R系统在不同场景的频谱需求结果,具体如图3所示。



(a) LTE-R系统上行业务频谱需求



(b) LTE-R系统下行业务频谱需求

图3 各场景下视频业务进程到达率对LTE-R系统频谱需求的影响分析

表9 视频业务在普速编组站场景下进程到达率的取值

业务类别	高进程到达率/(进程·(s·用户) ⁻¹)	低进程到达率/(进程·(s·用户) ⁻¹)
机车自动视频监控(AVDR)	0.04	0.01
特殊区域线路视频监控	0.02	0
调机视频监控	0.012	0.002 5
作业视频监控	0.002 5	0.002 5
列车安全视频监控	0.001 25	0.001 25
道岔缺口视频监控	0.003 5	0.002 5



通过图 3 可以看出,不考虑视频业务时,LTE-R 系统的频谱需求带宽约为 4 MHz,目前已分配给 GSM-R 系统的频谱带宽可以满足其带宽需求;考虑视频业务时,编组站场景下带宽需求增长最为明显,因此 LTE-R 系统上下行频谱需求带宽分别至少需要 10 MHz、4.25 MHz,当前分配给 GSM-R 系统的频谱带宽无法满足其需求。此外还可以发现,视频业务的引入将致使 LTE-R 系统的上下行带宽需求不对称的特点更加显著。

5 结束语

LTE-R 是下一代铁路移动通信系统,为了满足 LTE-R 系统的用频需求,需要对其频谱需求总量进行科学合理的预测。在深入分析 ITU-R M.1768 方法的基础上,本文提出了一种基于时延差异性约束的 LTE-R 系统频谱需求预测方法。相比 ITU-R M.1768 方法,本文提出的频谱需求预测方法做了 3 个方面改进:研究对象不同,一个面向公众移动通信系统,一个面向铁路下一代专用无线通信系统 LTE-R;重新定义了频谱需求预测方法的两大核心因素:服务类别(SC)、服务环境(SE),根据 LTE-R 系统的业务特征、性能指标要求与应用场景,定义了 9 种服务类别和 9 种服务环境;基于重新定义的 SC/SE,分析得出了 LTE-R 系统不同服务类别对时延的要求,并利用 M/G/1 排队模型测算了不同时延约束条件下 LTE-R 系统在不同服务环境下需要的系统频谱需求。结果表明,我国 LTE-R 系统上行和下行频谱需求可能的范围分别是 14~15 MHz 和 5~6 MHz。LTE-R 网络实际承载层面的工程频率效率和基于高带宽的视频业务量将是影响频谱带宽需求总量的两个关键因素。若不考虑未来新增的视频业务量,LTE-R 的频谱带宽需求约为 4 MHz,目前分配给 GSM-R 的频谱资源即可满足其带宽需求。

参考文献:

[1] AWG-20. Working document towards a draft APT report on

- system description of railway radiocommunication system between train and trackside (RSTT): AWG-20/TMP-43 (Rev.1)[S]. 2016.
- [2] AI B, GUAN K, RUPP M, et al. Future railway services-oriented mobile communications network[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(10): 78-85.
- [3] HE R, AI B, WANG G, et al. High-speed railway communications: from GSM-R to LTE-R[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2016, 11(3): 49-58.
- [4] 北京交通大学, 中国中铁二院工程集团有限责任公司, 中国铁道科学研究院, 等. 下一代铁路移动通信系统频率及制式研究报告[R]. 2015.
Beijing Jiaotong University, China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., China Academy of Railway Sciences, et al. Research report on frequency and system of next generation railway mobile communication system[R]. 2015.
- [5] SNIADY A, SOLER J. LTE for railways: impact on performance of ETCS railway signaling[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2014, 9(2): 69-77.
- [6] ITU-R. Methodology for the calculation of IMT-2000 terrestrial spectrum requirements: M 1390-0[S]. 1999.
- [7] ITU-R. Methodology for calculation of spectrum requirements for the terrestrial component of International Mobile Telecommunications: M 1768-1[S]. 2013.
- [8] ITU-R. Traffic forecasts and estimated spectrum requirements for the satellite component of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000 for the period 2010 to 2020: M 2077-0[S]. 2006.
- [9] ITU-R. Traffic forecasts and estimated spectrum requirements for future development of the mobile-satellite service in the range 4-16 GHz: M 2218-0[S]. 2011.
- [10] ITU-R. Radiocommunication objectives and requirements for Public Protection and Disaster Relief (PPDR): Document 5A/469[S]. 2017.
- [11] ITU-R. Spectrum needs for the terrestrial component of IMT in the frequency range between 24.25 GHz and 86 GHz: document 5D/TEMP/171[S]. 2016.
- [12] ITU. Final acts WRC-15 world radiocommunication conference 2015[S]. 2015.
- [13] ITU-R. Future spectrum requirements estimate for terrestrial IMT: M 2290-0[S]. 2013.
- [14] 中国铁路下一代移动通信技术研究工作组. WG1-2016-001-V1.0.中国铁路下一代移动通信系统频率及制式深化研究(V1.0)[S]. 2016.
Research Group of Next Generation Mobile Communication Technology for China Railway. WG1-2016-001-V1.0. Deepening research on frequency and standard of next generation mobile communication system for China railway(V1.0)[S]. 2016.
- [15] 3GPP. Technical specification group services and system aspects; policy and charging control architecture: TS23.203 v9.14.0[S]. 2014.

- [16] 吴宇. 铁路站场 LTE-R 宽带移动通信系统研究[J]. 铁道通信信号, 2016, 52(8): 75-78.
WU Y. Research on LTE-R broadband mobile communication system in railway station[J]. Railway Signaling & Communication, 2016, 52(8): 75-78.
- [17] ZHANG Y, XIONG L, JIANG W, et al. Analysis and research on spectrum requirements of LTE for railways[C]//International Conference on Wireless, Mobile and Multi-Media, Nov 20-23, 2015, Beijing, China. New Jersey: IEEE Press, 2016: 83-86.
- [18] HIDEAKI T, BERNHARD H W. Spectrum requirement planning in wireless communications model and methodology for IMT-Advanced[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2008.
- [19] ITU-R. Study on spectrum of railway radiocommunication between train and trackside (RSTT) with respect to the train radio applications: Document 5A/439[S]. 2017.
- [20] 李文宇, 宋丽娜, 何秀森, 等. LTE 产业发展分析和展望[J]. 电信科学, 2014, 30(3): 6-11.
LI W Y, SONG L N, HE X M, et al. Development analysis and perspective on LTE current status[J]. Telecommunications Science, 2014, 30(3): 6-11.

[作者简介]



刘鹏 (1992-), 男, 华北电力大学硕士生, 主要研究方向为无线通信网络与新技术、无线通信系统频率规划等。



李伟 (1984-), 男, 博士, 国家无线电监测中心高级工程师, 主要研究方向为频谱需求预测、电磁兼容分析、频谱管理技术等。



刘斌 (1980-) 男, 国家无线电监测中心副处长、高级工程师, 主要从事无线电频谱管理技术和政策研究工作, 担任 ITU-R 和 APT 关于铁路无线电通信系统的 WRC 议题相关研究工作组主席。



王坦 (1985-), 男, 博士, 国家无线电监测中心高级工程师, 主要研究方向为频率规划、频率评估和 5G 频率管理研究等。



耿绥燕 (1966-), 女, 博士, 华北电力大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为毫米波 MIMO 无线通信信道实验与建模、UWB 短距离通信技术及应用、无线通信系统链路分析等。