

# 不同调制方式干扰对 LTE-M 的性能影响分析

张科博<sup>1</sup> 邹劲柏<sup>1,2</sup> 张海娟<sup>1</sup>

(1. 上海应用技术大学轨道交通学院, 201400, 上海; 2. 同济大学电子与信息工程学院, 201804, 上海//第一作者, 硕士研究生)

**摘要** LTE(长期演进)技术是城市轨道交通车地无线通信的重要发展方向,分析了LTE-M(城市轨道交通车地综合通信系统)在不同调制方式干扰下的解调传输性能。LTE-M系统采用了高阶QAM(正交幅度调制)基带调制解调技术,通过建立QAM的系统模型,分析了16-QAM信号在信道背景噪声为AWGN(加性高斯白噪声)下的传输性能,并在此基础上推导出不同调制下的干扰对M-QAM(多进制正交幅度调制)的误比特率通用公式。研究16-QAM的传输性能,分析相位差对干扰效能影响程度。仿真结果表明:16-QAM信号的解调传输性能受QPSK(正交相移键控)调制干扰信号影响最大;16-QAM与QPSK调制干扰信号存在相位偏移,相比AWGN干扰,QPSK调制干扰下,16-QAM解调传输性能会变化;干扰信号的不同相位偏移对系统误比特率影响变化较小。

**关键词** 城市轨道交通; LTE-M; 误比特率; 干扰

**中图分类号** U285.2

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2020.08.034

## Influence of Different Modulation Interference on LTE-M Performance

ZHANG Kebo, ZOU Jinbai, ZHANG Haijuan

**Abstract** LTE (long term evolution) technology is an important direction for urban rail transit train-ground wireless communication development. The demodulation performance of LTE-M (LTE metro) system under interference of different modulation is analyzed, it adopts high-order QAM (quadrature amplitude modulation) baseband modulation and demodulation technology. By establishing a QAM system model, the performance of 16 QAM signal in the channel noise of AWGN (additive white Gaussian noise) is analyzed, on top of which, the general BER formula of M-QAM system interference under different modulation is deduced. Through studying the transmission performance of 16 QAM, the effect of phase difference on interference performance is analyzed. The simulation results show that the demodulation and transmission performance of the 16 QAM signal is most affected by the QPSK modulated interference signal. Since the 16 QAM and QPSK (quadrature phase shift keying) modulated interference signals have a phase shift, compared to AWGN interference, the 16 QAM demodulation and transmis-

sion performance will deteriorate under QPSK modulation interference. The different phase offsets of interfering signal have little effect on the system BER (bit error ratio).

**Key words** urban rail transit; LTE-M; BER; Interference

**First-author's address** Shanghai Institute of Technology, 201400, Shanghai, China

目前,越来越多城市轨道交通线路的车地传输系统采用LTE-M(LTE-Metro,城市轨道交通车地综合通信系统)承载PIS/CCTV(乘客信息系统/闭路电视监控系统)业务,部分线路已实现LTE-M系统承载CBTC(基于通信列车控制)业务。基于LTE-M的城市轨道交通车地综合传输系统逐步成为主流系统,但目前大多既有线的车地无线传输系统仍采用WLAN(无线局域网)技术组建。城市轨道交通的无线通信信号、运营商无线网络均通过漏泄电缆实现隧道全覆盖,而CBTC车地传输系统的抗干扰性能是城市轨道交通安全运营的关键,因此避免城市轨道交通各无线系统在狭小隧道等环境产生相互干扰影响显得尤为重要。

LTE-M是利用TD-LTE(分时长期演进)技术,基带调制有PSK(相移键控)和QAM(正交幅度调制)等调制技术。其中,PSK又分为BPSK(二进制相移键控)和QPSK(正交相移键控)两种,QAM又分16-QAM和64-QAM两种。城市轨道交通中的WLAN是基于IEEE 802.11标准,调制方案与LTE-M基本相同,同时采用了PSK和QAM等调制方式。QAM是一种高效的调制方式,作为LTE-M主要的基带调制方式,频谱利用率高,然而在城市轨道交通复杂的隧道等环境下,存在不同调制方式的干扰信号,会导致QAM解调性能恶化<sup>[4]</sup>。这必然会影响到LTE-M系统的通信性能,甚至会影响到列车运行。

目前针对LTE-M的不同调制干扰对解调传输性能影响的分析较少,文献[6]分析了TD-LTE与WLAN系统室内共存情况,分别对合路和独立两种

部署情况进行了现场测试,分析了异系统间的相互干扰,通过确定性分析获得了计算所需隔离度,并测试分析了终端距离间隔对系统性能的影响。文献[8]探讨了城市轨道交通隧道环境下 WLAN 技术在 PIS 和 CBTC 两系统之间的干扰情况,介绍了避免相邻 AP(无线接入点)之间的无线信号同频干扰的方法。文献[9]对噪声调制分别进行乘积调制和卷积调制方式,以获得灵巧噪声;干扰信号能自动选择调制方式,通过获得匹配滤波等对雷达信号进行干扰。

本文主要考虑不同系统的不同调制方式在 AWGN(加性高斯白噪声)信道下对 LTE-M 系统中 QAM 解调传输性能的影响。以 16-QAM 为例,假设存在干扰,在此条件下,首先推导了 M-QAM(多进制正交幅度调制)通信信号的误码率通用公式,

讨论了不同相差干扰对 16-QAM 系统误码率的影响;最后通过 MATLAB 软件仿真进行验证,分析得到干扰调制方式对解调传输性能的影响。

## 1 WLAN 对 LTE-M 的干扰及 LTE-M 自身干扰分析

在城市轨道交通中,基于 LTE-M 的车地综合传输系统已经实现了工程化。LTE-M 主要由核心网(EPC)、演进 Node B(eNode B)和用户设备(UE)3 部分组成,其车地综合传输系统组成如图 1 所示。在城市轨道交通中,主要是通过漏泄电缆及天线方式接发 LTE-M 射频信号;LTE-M 采用冗余双网设计,分为 A、B 两个网络,A 网主要承载 CBTC 业务,B 网承载 PIS 业务和具有 CBTC 业务备份等功能。

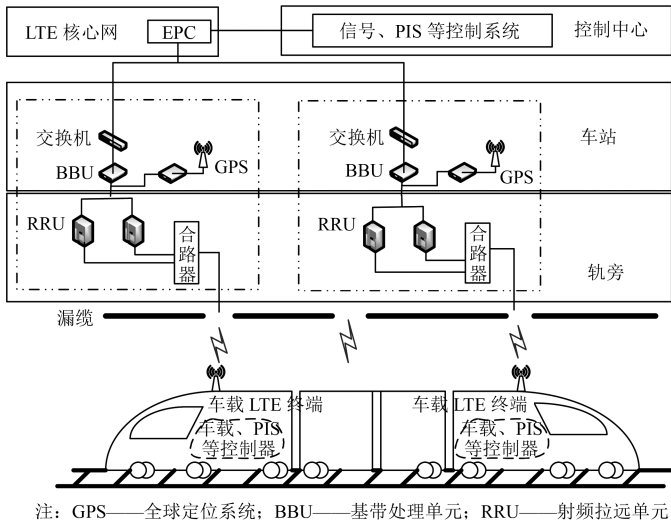


图 1 LTE-M 车地无线传输系统示意图

WLAN 与 LTE-M 都是以 TDD(时分双工)的方式工作。在隧道环境中,LTE-M 的 UE 接收到 WLAN 终端的 STA(站)的上行直接干扰影响较大<sup>[11]</sup>;基站发射功率比较高,LTE-M 的 BS(基站)受到 WLAN 的 AP 下行直接干扰影响也会比较大。LTE-M 与 WLAN 间干扰的基本模式示意图如图 2 所示。此外各系统的 LTE-M 信号在密集空间中共存,经隧道内壁、车体等反射也可能接收到二次或多次反射 LTE-M 内同频干扰,也会降低 LTE-M 性

能。无论是 LTE-M 内同频干扰、还是与 WLAN 间邻频干扰或互调干扰,LTE-M 的误比特率与干扰源的功率有关且成正相关。

LTE-M 中的 QAM 是主要的基带调制技术,可提升频谱资源利用率。QAM 调制分为 16-QAM 和 64-QAM,不同调制方式干扰信号对 QAM 信号的性能影响是有差异的。LTE-M 的解调传输性能受到的干扰源信号大多是 WLAN 发射的信号。LTE-M 基带信号经 QAM 调制后,分别研究不同调制方式的干扰信号对 QAM 信号的影响程度。

## 2 受干扰下的 M-QAM 解调模型

### 2.1 高斯白噪声下的 M-QAM 的通用公式

假设干扰信号与 LTE-M 信号时间同步且存在

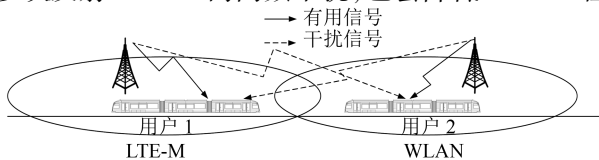


图 2 LTE-M 与 WLAN 间干扰基本模式示意图

相干,码率一致等的理想情况下,对已知解调方式信号,假设它的复包络为:

$$S(t) = A \sum_n b(t - nT, X_n) \quad (1)$$

其中:  $b(t, X_n) = X_n h_a(t)$ ,  $h_a(t)$  表示信号的幅度脉冲形状,可取为平方根升余弦脉冲;  $X_n = X_{I,n} + jX_{Q,n}$  表示在符号周期  $n$  内已知调制信号的发送的复数据符号,  $X_{I,n}$  表示同相分量,  $X_{Q,n}$  表示正交分量,  $j$  为虚数单位; QAM 的相位幅度等由数据符号  $X_n$  决定;  $T$  表示码元带宽;  $A$  表示符合某一调制方式的已调符号;  $t$  表示时间;  $b$  表示一个低通信号。

使用基函数获得  $s(t)$  向量表征为:

$$\phi(t) = \sqrt{\frac{A^2}{2E_h}} h_a(t) \quad (2)$$

其中:  $E_h = \frac{A^2}{2} \int_{-\infty}^{\infty} h_a^2(t) dt$  表示带通脉冲  $Ah_a(t) \cos 2\pi f_c t$  的能量,  $f_c$  表示频率。由此可获得单个符号波形复包络为:

$$S_{Lm} = \sqrt{2E_h} X_m \phi(t) \quad (3)$$

式中:

$X_m$ ——符号第  $m$  个周内已知调制信号发送的复数据符号;

$\phi(t)$ —— $s(t)$  向量表征。

则等效低通表达式为:

$$S_n(t) = \frac{1}{2} \sum_{-\infty}^{\infty} \sqrt{2E_h} X_m \phi(t - nT) \quad (4)$$

同理可得干扰信号的等效低通表达式为:

$$j_l(t) = \frac{1}{2} \sum_l^{\infty} \sqrt{2E_j} j_l \phi(t - lT) \quad (5)$$

式中:

$j_l$ ——已调制的第  $l$  个周期内的干扰信号符号,其符合  $F_j(j)$  分布;

$E_j$ ——带通脉冲的能量。

假设信道的背景噪声为 AWGN,且在无信道衰落的情况下,当干扰信号和通信信号被接收机完全同步接收时,则接收机输入端接收的信号  $r_m$  表示为:

$$r_m = r(t = mT) = \frac{1}{2} (\sqrt{2E_h} X_m + \sqrt{2E_j} j_m) + n_m, \quad (6)$$

其中,  $n_m$  是零均值的高斯白噪声,  $r_m$  表示接收的信号,已调符号  $X_m$ 、干扰已调符号  $j_m$  和高斯白噪声  $n_m$  之间相互独立。

## 2.2 比特差错率分析

对于  $M$ -QAM,可以构成一个  $M = 4^m$  大小的平方状的星座图,比如 16-QAM 的星座图如图 3 所示,可以被看作有两个  $\sqrt{M}$ -PAM (脉冲振幅调制) 系统正交而成,其中,对于任意两个信号向量之间的最小的欧式距离为  $2\sqrt{2E_h}$ 。所以,16-QAM 可以被看成由两个独立的 4-PAM 正交而成,且每一个 4-PAM 的功率为 16-QAM 的一半。

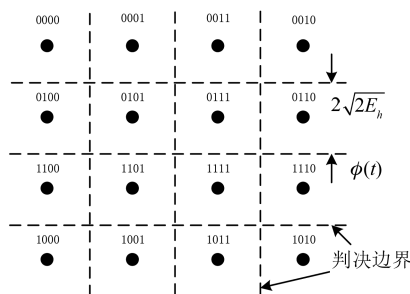


图3 16-QAM 星座的复信号空间图

对于  $\sqrt{M}$ -PAM,在信号星座图的  $M-2$  个内部点,符号差错概率为:

$$P_i = 2Q\left(\frac{2\alpha^2 E_h}{N_0}\right) \quad (7)$$

其中,  $Q(x)$  表示标准正态分布的右尾函数,即高斯  $Q$  函数,方差为  $N_0$ ;  $\alpha$  是信道衰落系数。

对于星座图的 2 个外部点,符号差错概率为:

$$P_o = Q\left(\sqrt{\frac{2\alpha^2 E_h}{N_0}}\right) \quad (8)$$

在不存在干扰且高斯白噪声信道时,假设星座上的所有的点其概率都相等,则整体的符号差错平均概率为:

$$P_M = \frac{M-2}{M} P_i + \frac{2}{M} P_o \quad (9)$$

化简后为:

$$P_M = 2\left(1 - \frac{1}{M}\right) Q\left(\sqrt{\frac{2\alpha^2 E_h}{N_0}}\right) \quad (10)$$

信号向量  $\mathbf{S}_m$  的符号能量可以表示为:

$$E_m = \frac{1}{2} \mathbf{S}_m^2 \quad (11)$$

根据信号相量与带通信号脉冲的关系为  $\mathbf{S}_m = \sqrt{2E_h} (2m-1-M)$ , 由此可得:

$$E_m = E_h (2m-1-M)^2 \quad (12)$$

则平均能量为:

$$E_{av} = E_h \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (2m - 1 - M)^2 \quad (13)$$

化简后为:

$$E_{av} = E_h \frac{M^2 - 1}{3} \quad (14)$$

平均符号能量噪声比  $\gamma_s = \frac{\alpha^2 E_{av}}{N_0}$ , 比特能量噪声

比  $\gamma_b = \frac{E_b}{N_0}$  (其中,  $E_b$  为单位比特信号能量), 因为在  
该 QAM 解调系统中  $\gamma_s = (\log_2 M) \gamma_b$ , 则根据式(1) —  
式(14)可得:

$$P_M = 2 \left( 1 - \frac{1}{M} \right) Q \left( \sqrt{\frac{6 \log_2 M}{M^2 - 1} \cdot \frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (15)$$

由于  $\text{erfc}(x) = 2Q(\sqrt{2}x)$ , 可得  $M$ -QAM 在无干  
扰情况下的  $P_M$  为:

$$P_M = \left( 1 - \frac{1}{M} \right) \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{3(\log_2 M)}{M^2 - 1} \cdot \frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (16)$$

其中  $\text{erfc}$  函数表示表示互补误差函数。

当  $M$ -QAM 中存在干扰信号时, 假设在相同维  
度情况下, 接收端接收到的输入信号  $x(t)$  为:

$$x(t) = \int_0^T \sqrt{2E_h} \bar{x}_m \cos^2(t) dt + \int_0^T \sqrt{2E_j} \bar{j}_m \cos^2(t) dt + 2 \int_0^T \bar{n}_m \cos^2(t) dt \quad (17)$$

其中,  $\bar{x}_m$  表示信号向量为已知调制信号符号,  $\bar{j}_m$   
表示信号向量为干扰已调符号,  $\bar{n}_m$  表示信号向量为  
零均值的高斯白噪声。决量的均值为  $J(t)$ 、方差为  
 $N_0$  的正态分布, 则该概率密度为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi N_0}} \exp \left\{ -\frac{[x - J(t)]^2}{2N_0} \right\} \quad (18)$$

当发送信号的误码率为等概率时, 系统的一维  
的误码率则可以认为是:

$$P_{m\_jam} = \frac{1}{4} \left[ \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{3(\log_2 M)}{M^2 - 1} \cdot \frac{E_b}{N_0}} + \frac{J(t)}{\sqrt{2N_0}} \right) + \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{3(\log_2 M)}{M^2 - 1} \cdot \frac{E_b}{N_0}} - \frac{J(t)}{\sqrt{2N_0}} \right) \right] \quad (19)$$

干扰信号的  $\bar{j}_m$  存在不确定性, 为保证式(19)具  
有普适性, 对其进行算数平均处理:

$$P_{m\_jam} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \frac{1}{4} \left[ \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{3(\log_2 M)}{M^2 - 1} \cdot \frac{E_b}{N_0}} + \frac{J(t)}{\sqrt{2N_0}} \right) + \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{3(\log_2 M)}{M^2 - 1} \cdot \frac{E_b}{N_0}} - \frac{J(t)}{\sqrt{2N_0}} \right) \right]$$

$$\text{erfc} \left( \sqrt{\frac{3(\log_2 M)}{M^2 - 1} \cdot \frac{E_b}{N_0}} - \frac{J(t)}{\sqrt{2N_0}} \right) \quad (20)$$

其中  $L$  表示在某一维上的映射数量, 则该  $M$ -  
QAM 的总误码率为:

$$P_{\text{whole}} = 1 - (1 - P_{m\_jam})^2 \quad (21)$$

### 3 不同相差干扰对 M-QAM 误码率的影响

假设干扰信号与  $M$ -QAM 存在相位偏移  $\varphi$ , 则  
接收机输入端接收的信号  $r_m$  可以表示为:

$$r_m = r(t = mT) = \frac{1}{2} (\sqrt{2E_h} X_m + \sqrt{2E_j} j_m \exp(i\varphi)) + n_m \quad (22)$$

其中相位偏移  $\varphi$  服从  $0 \sim 2\pi$  的均匀分布。

所以每一维的误码率可以表示为:

$$P_{\text{phase}} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \frac{1}{4} \left[ \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{3(\log_2 M)}{M^2 - 1} \cdot \frac{E_b}{N_0}} + \frac{J(t)}{\sqrt{2N_0}} (\text{Re} \cos \varphi + \text{Im} \sin \varphi) \right) + \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{3(\log_2 M)}{M^2 - 1} \cdot \frac{E_b}{N_0}} - \frac{J(t)}{\sqrt{2N_0}} (\text{Re} \cos \varphi + \text{Im} \sin \varphi) \right) \right] \quad (23)$$

其中,  $\text{Re}$  表示实数部分,  $\text{Im}$  表示虚数部分

由此可得相位偏移总的误码率为:

$$P_{\text{phase\_whole}} = 1 - (1 - P_{\text{phase}})^2 \quad (24)$$

### 4 仿真及分析

利用 MATLAB 软件建立 16-QAM 仿真系统,  
在验证仿真误码率和理论误码率结果基本一致的  
前提下, 假设通信信号通过信道无衰落。在信道的  
背景噪声为 AWGN 下, 干扰信号发射功率小于被  
干扰信号, 且不考虑编码方式对信号的影响等因  
素, 主要考虑 WLAN 常用的 QPSK、BPSK、QAM 等  
调制方式的信号可能会对基于 LTE-M 的车地无线  
通信系统的影响; 其次是在通信信号和干扰信号会  
存在相位偏差, 探究相位变化对 LTE-M 解调传输  
性能影响是否存在变化。噪声模型采用高斯分布,  
由  $[0 \ 1]$  均匀分布随机产生标准复高斯随机数; 窄  
带高斯噪声与不同调制基带通信信号进行噪声乘  
积调制方式得到输出噪声干扰信号, 并与受干扰源  
进行乘积调制。本文仿真采用的信号及干扰载频  
均为 1.8 GHz。

图4中主要涉及QPSK干扰、BPSK干扰和QAM干扰在非相干条件下在AWGN噪声环境下的系统解调性能仿真,可以看出在上述已给定的条件下,整体上,QPSK干扰对QAM调制通信信号造成的影响相对于其他两种调制干扰对QAM解调系统造成的影响,前者造成的影响较大。当比特能量噪声值小于4 dB时,不同调制干扰对QAM解调系统的解调传输性能影响变化并不显著;当比特能量噪声比超过6 dB时,BPSK干扰比QAM干扰对QAM的解调传输性能影响明显要大很多。图4的仿真结果验证了上述公式的正确性。

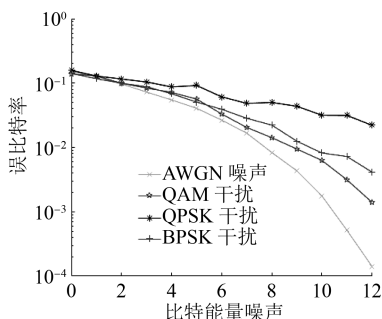


图4 不同调制方式干扰下16-QAM的解调性能

从图5可以看出,在AWGN信道环境下,16-QAM的通信信号与QPSK干扰信号存在相位差,相位差分别设为 $0$ 、 $\pi/8$ 、 $\pi/4$ 、 $\pi/2$ ,在比特能量噪声一定的条件下,相位偏移对16-QAM的解调传输性能影响较小。仿真结果验证了上述公式的正确性。

## 5 结语

本文首先在理想条件下分析了不同调制信号对LTE-M中基带信号经过QAM调制后解调传输性能的影响;建立在高斯白噪声信道下,推导出了M-QAM通用公式,从理论上分析了在不同调制信号对经过QAM调制解调后,导致接收信号的误码率升高;对QPSK信号与QAM信号存在相位偏移的情况进行了分析,由仿真结果可知,在比特噪声

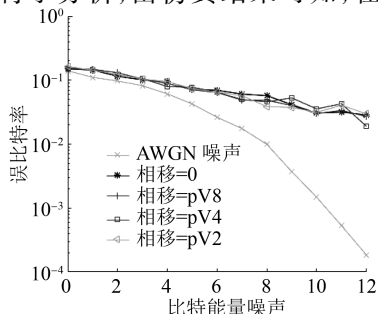


图5 不同相位差的QPSK干扰下16-QAM的解调性能

小于3 dB时,各调制信号干扰的对QAM解调传输性能影响很小;当比特能量噪声比超过5 dB时,QPSK信号对QAM信号的解调性恶化最为严重。QAM信号与QPSK信号存在相位偏移,对QAM解调系统的解调传输性能影响程度较小,验证了误码公式的正确性。在城市轨道交通隧道等复杂空间中存在各种调制信号,本文分析了如何避免各种调制信号对LTE-M性能的影响,对工程实践具有一定的指导作用。

## 参考文献

- [1] 秦伟,王可人,金虎,等.不同干扰对QAM解调性能的影响分析[J].通信技术,2016(49): 1109.
- [2] 孙震宇.轨道交通车地无线组网技术及干扰分析[J].城市轨道交通研究,2015(4): 51.
- [3] 于风云,张平. QAM调制与解调的全数字实现[J].现代电子技术,2005(3): 53.
- [4] RICHARD A P. 现代通信干扰原理与技术. [M]. 2版. 北京: 电子工业出版社,2014.
- [5] GORDON L S. 移动通信原理[M]. 3版. 机械工业出版社. 2014.
- [6] 陈霞. TD-LTE与WLAN系统干扰研究[J]. 电信科学,2012(3): 91.
- [7] 戴克平,张艳兵,朱力,等. 基于LTE的城市轨道交通车地通信综合承载系统[J]. 都市快轨交通,2016(1): 69.
- [8] 李佳伟. 轨道交通PIS与CBTC无线组网技术及干扰分析研究[J]. 轨道交通学报,2011(6): 88.
- [9] 郭诚,颜振亚. 噪声调制灵巧噪声对雷达干扰性能研究 with实现[J]. 现代雷达,2014(7): 77.
- [10] 宋鸿昇,张晴,杨世华,等. LTE-M在城市轨道交通车地无线通信中的应用[J]. 城市轨道交通研究,2016(增刊2): 71.
- [11] 王侃,王家玮. WLAN与TD-LTE系统在2.4 GHz频段共存干扰[J]. 电子科技,2011(9): 62.
- [12] DHARMENDRA S, RAM N Y. Simplified approximations to the average of some useful forms of Gaussian Q functions with MRC diversity reception over Nakagami-q and Rician fading channels and their applications[J]. AEUE-International Journal of Electronics and Communications,2017,82: 167.
- [13] Jaime C S, MARIANO M G, JOSÉ I A, et al. Long term evolution in high speed railway environments; feasibility and challenges[J]. Bell Labs Technical Journal. ,2013(2): 237.
- [14] SNIADY A, SOLER J. LTE for railways; impact on performance of ETCS railway signaling[J]. Vehicular Technology Magazine,2014(2): 69.

(收稿日期:2018-11-01)