

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.03.002

城市空间无线定位信号传播模型校正方法研究

邓中亮,肖占蒙,贾步云,莫君

(北京邮电大学,北京 100876)

摘要:城市空间中的无线定位信号会因建筑物的遮挡等原因发生不同程度的衰落,信号的传播模型能够较好地描述这种衰落情况。传播模型是时分码分-正交频分复用(Time & Code Division-Orthogonal Frequency Division Multiplexing,TC-OFDM)信号进行广域室内外无缝定位网络规划的基础,传播模型的准确性直接关系到基站布局规划的合理性。在对经典室外传播模型和现有模型校正方法研究的基础上,提出了一种新型的基于非线性最小二乘法的 Okumura-Hata 校正模型,通过添加校正因子使模型更加接近实测数据。误差分析和仿真结果表明,相比传统的室外传播模型,所提出的校正模型可以提高 TC-OFDM 信号的预测准确度 5dB 以上,为 TC-OFDM 基站的合理布局提供理论依据。

关键词:TC-OFDM;非线性最小二乘法;Okumura-Hata;校正模型

中图分类号:U666.12

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2017)03-0011-06

Research on Correction Method of Wireless Positioning Signal Propagation Model in Urban Area

DENG Zhong-liang, XIAO Zhan-meng, JIA Bu-yun, MO Jun

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: The wireless signals for locating fade out in urban area due to the well-known issues such as the block of buildings. Propagation model can describe this fading precisely. The propagation model is the basis of the wide-area indoor and outdoor seamless location network planning of Time & Code Division-Orthogonal Frequency Division Multiplexing (TC-OFDM). The accuracy of the propagation model directly affects the rationality of the base station layout planning. Based on the study of classical outdoor propagation model and existing model correction method, a Okumura-Hata correction model using nonlinear least squares method is proposed. The difference between field test data and estimated data predicted by the proposed model becomes smaller by adding correction factors in the model. The error analysis and simulation results show that compared with the traditional outdoor propagation model, the proposed correction model can improve the prediction accuracy of TC-OFDM signal by more than 5dB, which provides the theoretical basis for planning a reasonable layout of TC-OFDM base stations.

Key words: TC-OFDM; Non-linear least squares; Okumura-Hata; Correction model

收稿日期:2017-02-02;修订日期:2017-03-14

基金项目:国家自然科学基金(61372110)

作者简介:邓中亮(1965-),男,博士,教授,主要从事室内外无缝定位、GNSS 和卫星通信方面的研究。

E-mail: dengzhl@bupt.edu.cn

0 引言

地面网络在城市中具有广泛的室内外信号覆盖能力。在不能直接接收卫星信号的区域内,地面基站定位系统能够作为全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的一种补充,为用户提供持续的位置服务(Location Based Service, LBS)。基于地面网络的时分码分-正交频分复用(Time & Code Division-Orthogonal Frequency Division Multiplexing, TC-OFDM)系统是一种典型的基站定位系统,可以实现广域高精度室内外无缝定位,水平方向定位精度优于3m,垂直方向定位精度优于1m。文献[1-2]对TC-OFDM系统进行了详细介绍。

为了能够实现城市环境中移动用户的精确定位,人们对城市环境中信号的特性做了多种研究并提出了多种相应的方法^[3-5]。传播模型是对无线信号传输信道的一种模拟和仿真,用来预测接收信号的场强,研究传播路径上障碍物阴影效应对信道衰落的影响^[6]。目前,传播模型的研究主要集中于两方面:确定性模型和统计模型。确定性模型,对具体环境直接应用电磁场理论进行计算得到,典型代表是射线跟踪法,但其应用较复杂,计算量大,目前使用较少。统计模型,对大量测量数据进行统计分析后导出公式,典型代表有Okumura模型^[7]、Longley-Rice模型^[8]、Durkin模型^[9]、COST 231-WI模型^[10-12]等,这类模型计算方法简单,而且不需要提供详细环境信息,因此被广泛应用。COST 231-WI模型广泛用于建筑物高度近似一致的郊区和城区环境。它是基于Walfisch-Bertoni模型和Ikegami模型得到的。Okumura-Hata模型也是根据实测数据建立的模型,该模型提供的数据较齐全,应用较广泛,适用于Very High Frequency(VHF)和Ultra High Frequency(UHF)频段。该模型的特点是:以准平坦地形大城市地区的场强中值路径损耗作为基准,对不同的传播环境和地形条件等因素用校正因子加以修正。本文研究的TC-OFDM信号无线传播模型是基于大量实验数据拟合得出的统计模型,通过对COST 231-WI模型与Okumura-Hata模型的路径损耗仿真结果对比发现,Okumura-Hata预测模型的路径损耗更接近于实测数据。

TC-OFDM定位系统主要应用于城市高大密集建筑物区域的位置服务,基站布局规划时需满足导航定位和中国移动多媒体广播(China Mobile Mul-

timedia Broadcasting, CMMB)通信的双重需要,同时还应考虑基站组网覆盖的最优化问题。本文采用Okumura-Hata预测模型对大量实测数据进行拟合,将该区域具有代表性的实测数据代入公式后通过最小二乘法对模型校正^[13],使预测的准确度达到TC-OFDM室内外高精度无缝定位导航系统规划设计的要求。最后,实验仿真验证了所提算法的正确性与有效性。

1 室外传播模型

Durkin模型由Edwards、Durkin和Dadson提出,描述了不规则地形的场强预测方法,当信号传播过程中遭遇不规则物体阻挡时,该模型也能够提供信号损耗的预测方法。

使用该模型首先需要利用传播路径中的地形数据重构地形地貌信息,第二步即计算径向方向上的路径损耗。由于Durkin模型在计算时只考虑了视距传播和阻挡体沿径向绕射这两种传播模式,因而不能精确预测由于树叶、建筑物或其他人造结构造成的传播效应,而且不能消除地面反射之外的多径传播。这并不适用于城市高大密集建筑物区域。

事实上,考虑到TC-OFDM信号所在的城区环境以及所使用的U波段频率,可以使用Hata模型对系统的路径损耗进行预测。根据所应用的频率的不同,Hata模型可分为Okumura-Hata模型和COST-231 Hata模型。COST-231 Hata模型是Hata模型的扩展版本,与Okumura-Hata模型相比,区别主要在于应用频率范围与频率衰减系数的差异。

根据实测数据建立的Okumura-Hata模型对无线信号的传播损耗预测适用性比较强,其适用频率范围为150~1500MHz,包括TC-OFDM所使用的频段。但其主要应用于1km以上的损耗预测,无法完全满足TC-OFDM系统的需求。

考虑较近范围内信号损耗预测的需要,Walfisch-Bertoni模型能够满足要求。作为其扩展模型的COST 231-WI模型广泛应用于建筑物高度近似一致的郊区和城区环境。其距离的适用范围为0.02~5km,但其频率的适用范围为800~2000MHz,并不包括当前TC-OFDM系统所使用的754MHz。

由于上述Okumura-Hata模型和COST 231-WI模型均部分满足TC-OFDM系统的需要,我们可以从中选择一个模型,利用实测数据对该模型进行校正,以使其满足使用的需要。

Okumura-Hata 公式是在 Okumura 模型的基础上, Hata 利用数学回归分析方法拟合出便于计算的无线传播经验公式

$$L_b = 69.55 + 26.16 \lg f - 13.82 \lg h_b + (44.9 - 6.55 \lg h_b) \lg d - a(h_m) \quad (1)$$

式中: d 为收发天线之间的距离, 单位 km;

f 为工作频率, 单位 MHz;

h_b 为基站高度, 单位 m;

$a(h_m)$ 为移动天线高度正因子, 单位 dB;

h_m 为移动天台高度, 单位 m。

当 $f \geq 300$ MHz 时

$$a(h_m)_{(大城市)} = 3.2 (\lg 11.75 h_m)^2 - 4.97 \quad (2)$$

COST 231-WI 模型考虑到了自由空间损耗、从建筑物到街面的损耗以及街道方向的影响, 其计算公式如下

$$L_{NLOS} = \begin{cases} L_{fs} + L_{rts} + L_{msd} & (L_{rts} + L_{msd} \geq 0) \\ L_{fs} & (L_{rts} + L_{msd} \leq 0) \end{cases} \quad (3)$$

$$L_{fs} = 32.44 + 20 \lg f + 20 \lg r \quad (4)$$

$$L_{rts} = -16.9 - 10 \lg \omega + 10 \lg f + 20 \lg \Delta h_m + L_{ori} \quad (5)$$

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354\phi & 0^\circ \leq \phi \leq 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\phi - 35^\circ) & 35^\circ \leq \phi \leq 55^\circ \\ 4 - 0.114(\phi - 55^\circ) & 55^\circ \leq \phi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (6)$$

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \lg d + k_f \lg f - 9 \lg b \quad (7)$$

根据实测数据的情况, 各参数按如下设定:

$$L_{bsh} = -18 \lg(1 + \Delta h_b)$$

$$k_a = 54, \quad k_d = 18,$$

$$k_f = -4 + \begin{cases} 0.7(f/925 - 1) & \text{中等城市和郊区} \\ 1.5(f/925 - 1) & \text{大城市} \end{cases}$$

其中, Δh_b 为基站天线高出建筑物屋顶的高度, 单位为 m; b 为建筑物间隔, 单位为 m; ω 为街道宽度, 单位为 m; ϕ 为街区轴线和发射机天线与接收机天线连线的夹角。

在与实测数据相同的环境条件下, 由两模型所得的信号损耗预测与实测数据对比如图 1 所示。

图 1 为 COST 231-WI model 和 Okumura-Hata model 仿真对比, COST 231-WI 模型采用中等城市模型(大城市模型对此仿真结果几乎没有影响)。观察可知, 在图 1 显示的距离范围内, 相较于 COST 231-WI 模型, Okumura-Hata 模型与实测数据具有更加接近的趋势, 即实测数据的变化率和 Okumura-Hata 模型的变化率接近一致。因此, 选择变化率更加

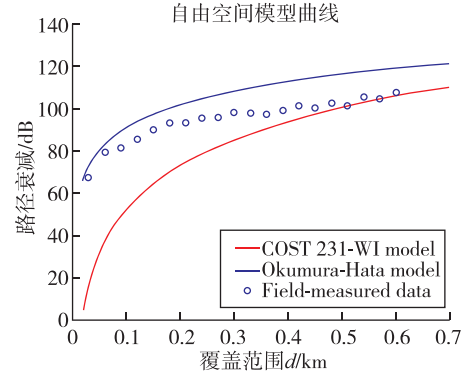


图 1 COST 231-WI model 和 Okumura-Hata model 仿真对比
Fig. 1 The COST 231-WI model and Okumura-Hata model simulation comparison

近似的 Okumura-Hata 模型进行校正, 使其在 1km 范围内满足 TC-OFDM 使用的需要。

2 Okumura-Hata 模型的校正

2.1 非线性最小二乘法

设用非线性函数 $f(c, x)$ 对数据 (x_i, y_i) 进行拟合, 在拟合函数 $f(c, x)$ 中, $c = (c_0, c_1, \dots, c_n)$ 为拟合系数, 其中某些为非线性系数, 如下所示

$$f(c, x) = c_0 + c_1 \exp(c_2 x) + c_3 \exp(c_4 x) \quad (8)$$

首先给拟合系数一个初始值, 并记为 $c_j(0)$ 且使 $c_j = c_j(0) + \delta c_j$, 在 $c_j(0)$ 附近对拟合函数 $f(c, x)$ 作泰勒级数展开, 当 $x = x_i$ 时, 有

$$f(c, x_i) = f_0(c, x_i) + \left(\frac{\partial f_0(c, x_i)}{\partial c_0} \right) \delta c_0 + \dots + \left(\frac{\partial f_0(c, x_i)}{\partial c_n} \right) \delta c_n \quad (9)$$

$$f_0(c, x_i) = f(c_0(0), c_1(0), \dots, c_n(0), x_i) \quad (10)$$

$$\frac{\partial f_0(c, x_i)}{\partial c_j} = \frac{\partial f(c_0(0), c_1(0), \dots, c_n(0), x_i)}{\partial c_j} \quad (11)$$

当选定拟合函数的具体形式, 并已知 $c_j(0)$ 和 x_i 时, 可求出 $f_0(c, x_i)$ 和各偏导数, 这样由式(8)可以看出, 函数 $f(c, x_i)$ 可以转化为一个关于 δc_j 的线性函数。可以定义拟合残差的平方和为

$$I = \sum [f(c, x_i) - y_i]^2 \quad (12)$$

将式(11)代入式(12)得

$$I = \sum \left[f_0(c, x_i) + \left(\frac{\partial f_0(c, x_i)}{\partial c_0} \right) \delta c_0 + \dots + \left(\frac{\partial f_0(c, x_i)}{\partial c_n} \right) \delta c_n - y_i \right]^2 \quad (13)$$

由以上分析可知, 根据最小二乘法原理, δc_j 确定时, 满足如下条件

$$2 \sum \begin{bmatrix} f_0(c, x_i) + (\frac{\partial f_0(c, x_i)}{\partial c_0}) \delta c_0 + \\ \dots + (\frac{\partial f_0(c, x_i)}{\partial c_n}) \delta c_n - y_i \end{bmatrix} (\frac{\partial f_0(c, x_i)}{\partial c_j}) = 0 \quad (14)$$

式(14)可以简化成线性方程组 $A \times C = B$, 求线性方程组的解, 从而求出拟合方程的系数 c_i [14]。

2.2 数据采集

传播损耗是空间中电波的传播由于阻挡、距离等多种因素带来的信号衰减, 也就是衰落。衰落中最主要的有瑞利衰落和阴影衰落, 即快衰落和慢衰落。为了获得符合 TC-OFDM 基站的无线电波传播模型, 提高覆盖预测的准确性, 为 TC-OFDM 基站组网规划打好基础, 采用 CW(Continue Wave)测试来对基站覆盖范围内的典型测试点进行数据采集, 减小测量误差 [15]。

经过地理平均得到每个特定区域的瞬时接收功率均值以后, 就可以计算每个点的路径损耗。我们所说的路径损耗是基站发射功率和移动台接收功率的差值, 需要消除天线增益、馈线损耗等影响后, 就得到可用于传播模型校正的路径损耗。

每个点的路径损耗为

$$L_b = P_t + G_b - L_a + G_m \quad (15)$$

其中, P_t 为基站发射功率, G_b 为基站天线增益, L_a 为基站耦合器与连接器损耗, G_m 为移动台天线功率。

TC-OFDM 室内外高精度无缝定位导航测试系统分布 4 个 TC-OFDM 室内外高精度无缝定位导航基站, 天线高度大致在 30~50m 范围, 对这 4 个基站做了大量的实地测量数据见表 1(限于篇幅, 仅以一个基站 1 为例)。

表 1 无线信号实测数据

Tab. 1 Wireless signal measured data

距离 /m	传播 损耗/dB	距离 /m	传播 损耗/dB	距离 /m	传播 损耗/dB	距离 /m	传播 损耗/dB
30	67.3	180	93.1	330	97.8	480	102.4
60	79.6	210	93.3	360	97.2	510	101.4
90	81.3	240	95.5	390	99.1	540	106.5
120	85.4	270	95.7	420	101.1	570	104.6
150	89.9	300	98.2	450	100.1	600	107.4

2.3 Okumura-Hata 模型校正过程

2.3.1 非线性最小二乘曲线拟合

模型校正问题实际上就是数学上的多元线性回

归方法问题。各类研究中均存在着模型校正问题 [17-18]。在科学实验和生产实践中, 有许多变量之间虽然有密切的关系, 可以由实验或观测到的一组数据点 (x_i, y_i) 来表示, 但这种关系 $y = f(x)$ 是未知的。由于是对 Okumura-Hata 模型校正, 给定一个实测路径损耗数据 B 和一个传播模型公式 AX , X 是传播模型公式中各变量的系数矩阵, 传播模型的校正问题就是成为求方程 $A \times X = B$ 的最小二乘的解的问题 [16]。

由于 TC-OFDM 室内外高精度无缝定位导航系统主要应用于大城市, 所以对 Okumura-Hata 的城市模型进行校正, Okumura-Hata 模型在城市路径损耗的数学表达式为

$$L_b(\text{市区}) = 69.55 + 26.16 \lg f - 13.82 \lg h_b + (44.9 - 6.55 \lg h_b)(\lg d) - a(h_m) \quad (16)$$

$$\text{其中, } a(h_m) = 3.2 (\lg 11.75 h_m)^2 - 4.97 \quad (17)$$

当基站工作频率 $f = 754\text{MHz}$, 接收平台 $h_m = 1\text{m}$ 和基站高度 h_b 为定值时, 式(16)可以写成

$$L_b = a + b \lg d \quad (18)$$

将 1 号基站和 2 号基站的实测数据分别经过非线性最小二乘法拟合, 得到 2 个路径损耗的曲线方程式

$$L_b = 111.59 + 27.83 \lg d \quad (19)$$

$$L_b = 116.65 + 30.65 \lg d \quad (20)$$

图 2 所示为实测数据在式(18)的基础上, 利用非线性最小二乘法得到的拟合曲线。

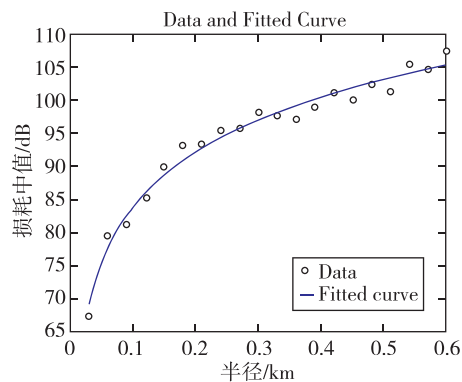


图 2 数据和拟合曲线

Fig. 2 Data and fitted curve

2.3.2 Okumura-Hata 校正模型

引入校正因子 α, β, γ , 将式(18)改写成如下包含校正因子的 Okumura-Hata 模型形式

$$L_b = l + 26.16 \lg f - 13.82 \alpha \lg h_b + (44.9 \beta - 6.55 \gamma \lg h_b) \lg d \quad (21)$$

分别将 2 个基站高度代入式(19)、式(20)、式(21)三个函数式解得 l, α, β, γ

$$\begin{cases} \alpha = 2.08 \\ \beta = 1.2 \\ \gamma = 2.45 \\ l = 83.84 \end{cases} \quad (22)$$

式(22)将移动天线高度正因子 $a(h_m)$ 包含在常数项中,移动接收天线高度 $h_m=1m$,则 $a(h_m)=-1.3$,代入式(21)得到带有修正因子的 Okumura-Hata 预测校正模型如下

$$L_b = 85.14 + 26.16 \lg f - 13.82 \alpha \lg h_b + [3.2 (\lg 11.75 h_m)^2 - 4.97] + (44.9 \beta - 6.55 \gamma \lg h_b) \lg d \quad (23)$$

各参数值如式(22)所示。

3 校正模型分析

3.1 实测值和拟合曲线分析

通过非线性最小二乘法对大量的实测点在 Okumura-Hata 的基础上进行校正分析得到带有校正因子的校正公式,从图 3 分析可以得出所有的实测数据点均匀地分布在曲线附近,带有校正因子的校正公式可以作为最终的校正模型对 TC-OFDM 信号进行传播分析。

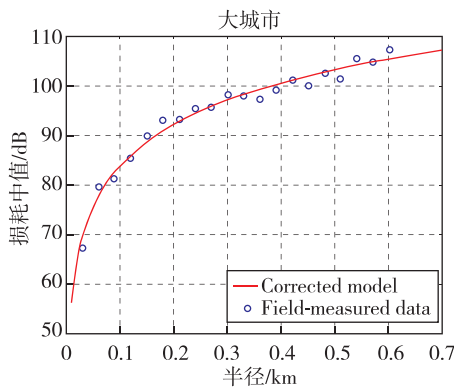


图 3 实测值与校正后模型对比

Fig. 3 Comparison between measured and corrected models

3.2 理论值、校正值和实测数据分析

把对基站的校正前后数据和实测数据进行路径损耗仿真对比,对比结果如图 4 所示,可以明显看出理论模型和校正模型的衰减变化趋势相同,但是校正后的模型和实测数据吻合度比较高,相对于理论模型提高了预测精度。

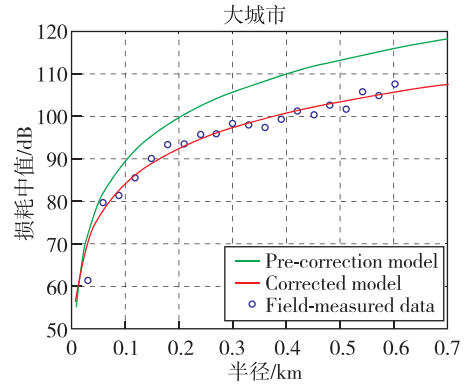


图 4 实测值与校正前、后模型对比

Fig. 4 Comparison between measured and corrected pre-corrected models

3.3 随机测试分析

由于传播模型校正采用 1 号和 2 号基站数据,选取 3 号和 4 号基站,随机对此基站选取若干个具有代表性的点进行测试,分别对实测数据和模型校正前后的理论计算值进行比较,计算误差进行误差分析。如表 2、表 3 所示分别为 3 号基站和 4 号基站的实测数据和理论数据分析。

表 2 无线信号模型误差分析

Tab. 2 Error analysis of wireless propagation model

距离 /m	实测值 /dBm	校正前 /dBm	误差 /dBm	校正后 /dBm	误差 /dBm
40	-57	-52.86	4.14	-49.94	7.06
130	-67.2	-70.67	-3.47	-64.09	3.11
280	-76.8	-82.3	-5.5	-73.3	3.5
370	-79.8	-86.5	-6.7	-76.64	3.16
460	-82	-89.8	-7.8	-79.3	2.7
570	-83.5	-93	-9.5	-81.8	1.7

表 3 无线信号模型误差分析

Tab. 3 Error analysis of wireless propagation model

距离 /m	实测值 /dBm	校正前 /dBm	误差 /dBm	校正后 /dBm	误差 /dBm
80	-64.5	-62.91	1.59	-58.26	6.24
150	-68.3	-72.21	-3.91	-65.8	2.5
230	-72.1	-78.5	-6.4	-70.94	1.16
360	-75.6	-85.2	-9.6	-76.32	-0.72
440	-79.4	-88.1	-8.7	-78.7	0.7
560	-82.9	-91.7	-8.8	-81.6	1.3

通过对表 2 和表 3 计算分析可得,表 2 校正前数据和实测数据误差的标准差为 4.41,校正后数据和实测数据误差的标准差为 1.67;表 3 校正前数据

和实测数据误差的标准差为 3.88,校正后数据和实测数据误差的标准差为 2.17。校正模型理论计算值与实测数据的误差明显低于原始模型理论计算值与实测数据的误差;当距离小于 50m 时校正模型误差偏大,随着传播距离的增加,距离越大校正模型的误差越小,校正模型的理论计算值与实测数据越接近。

4 结论

TC-OFDM 定位基站的无线传播模型是实现广域定位的基础,合适的无线传播模型对 TC-OFDM 广域定位的网络优化起着至关重要的作用。TC-OFDM 定位信号传播模型可以提高定位信号覆盖质量和基站组网优化。通过对 TC-OFDM 室内外高精度无缝定位导航系统基站的长期观测和对测试数据仿真分析,得到了适用于 TC-OFDM 信号的包含校正因子的 Okumura-Hata 无线传播校正模型。相较于传统的 Okumura-Hata 无线传播模型,校正因子的加入使模型对传播损耗的预测误差降低了 5dB 以上,可以作为 TC-OFDM 室内外高精度无缝定位导航基站组网优化的重要参考因素。

参考文献

- [1] Deng Z, Yu Y, Xie Y, et al. Situation and development tendency of indoor positioning [J]. *China Communications*, 2013, 10(3):42-55.
- [2] Deng Z, Mo J, Jiao J, et al. Multi-network integration of location-aware and services [C]//*Proceedings of the Chinese Automation Congress*. 2015:1149-1153.
- [3] Tsalolihin E, Bilik I, Blaunstein N. Mobile user location in dense urban environment using unified statistical model [C]//*Proceedings of the 4th European Conference on Antennas & Propagation (EuCAP)*. IEEE Xplore, 2010: 1-5.
- [4] Imai T, Taga T. Statistical scattering model in urban propagation environment [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2006, 55(4):1081-1093.
- [5] Keawbunsong P, Promwong S. Comparison study on path loss model for DVB-T2 propagation in urban area [C]//*IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA)*. IEEE, 2015:1-4.
- [6] 杨明静. 3G 无线传播模型校正及其应用研究[D]. 吉林大学, 2008.
- [7] Okumura Y, Ohmori E, Kawano T, et al. Field strength and its variability in VHF and UHF land mobile radio service [J]. *Review of the Electrical Communications Laboratories*, 1968, 16(9-10):825-873.
- [8] Rice P L, Longley A G, Norton K A, et al. Transmission loss predictions for tropospheric communication circuits [S]. National Bureau of Standards, Technical Note 101, U.S. Department of Commerce NTIA-ITS, revised 1967-01-01.
- [9] Rappaport T S. *Wireless communications: principles and practice* [M]. Prentice-Hall, Englewood Cliff NJ, 1996.
- [10] COST 231. Digital mobile radio towards future generation systems [R]. Final Report, COST Telecommunication Secretariat, European Commission. Brussels, Belgium, 1999.
- [11] Urban transmission loss models for mobile radio in the 900 and 1800 MHz bands, revision 2 [C]//*European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research EURO-COST231*. The Hague, 1991.
- [12] Damosso E. Action COST 231: a commitment to the transition from GSM to UMTS [C]//*IEEE International Conference on Personal Wireless Communications*. IEEE, 1994: 234-238.
- [13] 罗淑婉, 杨庚. TD-SCDMA 无线传播模型校正[J]. *广东通信技术*, 2007, 27(1):37-41.
- [14] Mathews J H, Fink K D. 数值方法(MATLAB 版): 第三版[M]. 北京:电子工业出版社, 2002.
- [15] 严彬. WCDMA 无线网络规划中的传播模型校正[J]. *电信工程技术与标准化*, 2006, 19(7):43-47.
- [16] 张洪. TD-LTE 无线传播模型参数校正研究[D]. 广东工业大学, 2013.
- [17] Jayaram M N, Venugopal C R. Modeling-simulation of an underground wireless communication channel [C]//*Proceedings of the International Conference on Internet Computing and Information Communications*. Springer India, 2014: 81-91.
- [18] Vasconcelos L S, Carrijo G A. A new correction for bullington multiple knife-edge model in VHF and UHF TV bands [J]. *IEEE Latin America Transactions*, 2016, 14(12): 4646-4651.
- [19] 张鑫, 杨明华. 基于城郊环境下 Okumura-Hata 预测模型的校正与实现[J]. *通信技术*, 2008, 41(5):67-68+78.