



LTE 传播模型浅析

赵明峰

(中国移动通信集团设计院有限公司四川分公司 成都 610045)

摘 要:针对特定的无线环境和采用的频率,选择良好的传播模型是准确进行网络规划和优化的基础。在评述目前国内外基于 LTE 所采用的经验传播模型、半经验模型及确定性模型的基础上,对各类传播模型进行了分析与比较,并给出了相同条件下不同传播模型的衰减损耗对比。在此基础上,给出了 LTE 在密集市区场景下的传播模型选择建议。

关键词: LTE; 经验模型; 半经验模型; 路径损耗

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.09.023

A Brief Analysis of Radio Propagation Models for Long Term Evolution

Zhao Mingfeng

(Sichuan Branch of China Mobile Group Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610045, China)

Abstract: The accurate network planning and optimization was based on good radio propagation model for the particular wireless environment and specific frequency. Several types of LTE-based propagation models were reviewed under the three kinds of propagation model such as empirical model, semi-empirical model and deterministic model. A comparison was made between different proposed propagation models that would be used for the LTE. Further, attenuation loss for the different propagation models under the same conditions was listed. Lastly, a good propagation model choice strategy for the TD-LTE in dense urban scene was presented.

Key words: LTE, empirical model, semi-empirical model, path loss

1 引言

无线传播模型用于描述发射机到接收机间信号的传播行为,主要与收发间的距离及路径损耗有关。无线传播模型是用于无线网络规划和优化的一种数学工具,它是基于不同频段的电磁波在各种地物、地貌传播下所得到的统计经验模型。无线传播模型按其性质主要分为经验模型、半经验模型以及确定性模型。因此,针对不同的频段,选择适合的传播模型,将有助于工程师预测特定站址在实际环境下的传播损耗,为网络规划及优化奠定基础。目前,中国移动所主导的 TD-LTE 试验网已完成了大量的测试和验

证,其中包含对 2.6 GHz(D 频段)的测试。2.6 GHz 频段是 ITU 所定义的 TDD 频段之一,而目前则被大多数国家采用作为 TD-LTE 的频段。

然而,由于现有的 GSM、TD-SCDMA、WCDMA 等所采用的频段都远低于该频段,同时由于 LTE 商用及试验网城市相对较少,所能获取的相关有用数据有限,导致目前缺乏针对不同场景的合理的传播模型。因此,国内外对该频段所采用的传播模型大多是基于现有的常用经验传播模型,并在此基础上根据路测数据进行模型校正,以尽量准确地反映真实场景下的传播损耗。尽管可以通过模型校正使得所采用的模型能够基本控制在要求的范围之内,然



而,由于不同模型的侧重点、适用场景以及参数等不完全一致性,导致各个模型之间校正的结果仍然存在较大差异。因此,针对不同的地貌及环境特点,选用相应适宜的传播模型,尽可能准确地描述特定场景下的传播模型,对于后续的网络规划及优化的准确性将起到非常重要的作用。

因此,了解目前国内外 LTE 所采用的传播模型现状,分析并比较各类模型的特点及要求,能够对目前的 TD-LTE 网络建设提供有力支撑。

2 LTE 传播模型

目前,LTE 所采用的传播模型主要是建立在现有统计经验模型、半经验模型的基础上,针对不同场景及设计规划经验,国内外主要采用 COST231-HATA 模型、扩展的 HATA (SDR) 模型、SUI 模型、COST231-Walfish-Ikegami (WI)模型、SPM 模型等作为校正模型,尽可能地拟合模拟真实信号的传播特性。

2.1 COST231-HATA 模型

欧洲科学技术研究协会 (COST) 针对个人移动通信的发展将传统的 HATA 模型扩展到 2 GHz。COST231-HATA 模型^[2]的数学表达式为:

$$P_t(d)\text{dB}=46.3+33.9\lg(f)-13.82\lg(h_t)-a(h_r)+(44.9-6.55\lg(h_r))\lg(d)+c_M \quad (1)$$

其中, f 表示频率范围,取值为 1.5~2 GHz; h_t 表示基站天线等效高度,取值为 30~300 m; h_r 表示移动台等效高度,取值为 1~10 m; d 表示收发间的距离,取值为 1~20 km; $a(h_r)=3.2(\lg(11.75h_r))^2-4.97$ (市区), $a(h_r)=(1.1\lg(f)-0.7)h_r-$

$(1.56\lg(f)-0.8)$ (郊区和平坦开阔区),通常市区环境修正参数 c_M 在中等规模城市和郊区取值为 0,大型城市取值为 3 dB。

2.2 扩展的 HATA(SDR)模型

扩展的 HATA 模型是英国电信管理机构 Ofcom 针对载波频率为 800 MHz 和 2 600 MHz 的 LTE 网络室外覆盖所采用的传播模型^[1]。扩展的 HATA 模型的数学表达式为:

$$P_t(f,h_1,h_2,d,env)=L+T(G(\sigma)) \quad (2)$$

其中, f 表示频率范围; h_1 表示发射基站天线等效高度; h_2 表示接收移动台等效高度; d 表示收发间的距离,单位为 km; env 表示一般环境,即市区、乡村、市郊; L 表示平均传播损耗; $H_m=\min(h_1,h_2)$; $H_b=\min(h_1,h_2)$, H_m 取值范围为 1~10 m, H_b 取值范围为 30~200 m。

基于不同的 d 和频率范围,平均传播损耗 L 的计算方式见表 1。

其中:

$$\alpha(H_m)=(1.1\lg(f)-0.7)\times\min\{10;H_m\}-(1.56\lg(f))+\max\{0;20\lg(H_m/10)\} \quad (3)$$

$$b(H_b)=\min\{0;20\lg(H_b/30)\} \quad (4)$$

$$\alpha=\begin{cases} 1, & d\leq 20 \text{ km} \\ 1+(0.14+1.87\times 10^{-4}\times f+1.07\times 10^{-3}H_b), \\ (\lg \frac{d}{20})^{0.8} & 20 \text{ km}<d<100 \text{ km} \end{cases} \quad (5)$$

路径损耗变量部分可采用对数正态分布求得(默认典型型取值为 10 dB),其相对标准差可由表 2 得到。

其中,扩展的 HATA(SDR)模型主要针对短距离设备,例如手持移动终端天线一般挂高为 1.5 m 内,在视距或者

表 1 距离与频率范围对传播损耗照

距离 d (km)	环境	频率 f 范围 (MHz)	平均传播损耗 L
$d<0.04$			$L=32.4+20\lg(f)+10\lg[d^2+\frac{(H_b-H_m)^2}{10^6}]$
$d>0.1$	市区	30~150	$L=69.6+26.2\lg(150)-20\lg(150/f)-13.82\lg(\max\{30,H_b\})+[44.9-6.55\lg(\max\{30,H_b\})](\lg(d))^\alpha-\alpha(H_m)-b(H_b)$
		150~1 500	$L=69.6+26.2\lg(f)-13.82\lg(\max\{30,H_b\})+[44.9-6.55\lg(\max\{30,H_b\})](\lg(d))^\alpha-\alpha(H_m)-b(H_b)$
		1 500~2 000	$L=4.63+33.9\lg(f)-13.82\lg(\max\{30,H_b\})+[44.9-6.55\lg(\max\{30,H_b\})](\lg(d))^\alpha-\alpha(H_m)-b(H_b)$
		2 000~3 000	$L=46.3+33.9\lg(2\ 000)+10\lg(f/2\ 000)-13.82\lg(\max\{30,H_b\})+[44.9-6.55\lg(\max\{30,H_b\})](\lg(d))^\alpha-\alpha(H_m)-b(H_b)$
	市郊		$L=L(urban)-2\times\{\lg[(\min\{\max\{150,f\};2\ 000\})/28]\}^2-5.4$
	开阔区		$L=L(urban)-4.78\times\{\lg[(\min\{\max\{150,f\};2\ 000\})/28]\}^2+18.33\times\lg[\min\{\max\{150,f\};2\ 000\}]-40.94$
$0.04<d<0.1$			$L=L(0.04)+\frac{[\lg(d)-\lg(0.04)]}{[\lg(0.1)-\lg(0.04)]}\times[L(0.1)-L(0.04)]$

表 2 标准差与距离关系

距离 $d(\text{km})$	传播模型	标准差
$d \leq 0.04$		$\sigma=3.5$
$0.04 < d \leq 0.1$	高于建筑物	$\sigma=3.5 + \frac{(12-3.5)}{(0.1-0.04)}(d-0.04)$
	低于建筑物	$\sigma=3.5 + \frac{(17-3.5)}{(0.1-0.04)}(d-0.04)$
$0.1 < d \leq 0.2$	高于建筑物	$\sigma=12$
	低于建筑物	$\sigma=17$
$0.2 < d \leq 0.6$	高于建筑物	$\sigma=12 + \frac{(9-12)}{(0.6-0.02)}(d-0.2)$
	低于建筑物	$\sigma=17 + \frac{(9-17)}{(0.6-0.2)}(d-0.2)$
$d > 0.6$		$\sigma=9$

准视距条件下其对应的干扰范围在 100 m 之内。因此,需要对 $b(H_b)$ 进行修正以精确描述,即将原表达式 $b(H_b)=\min\{0;20\lg(H_b/30)\}$ 更改为:

$$b(H_b)=(1.1\lg(f)-0.7)\times\min(10,H_b)-(1.56\lg(f)-0.8)+\max(0,20\lg(H_b/10)) \quad (6)$$

式(6)对应的基站发射天线高度取值范围为 1.5~30 m。

2.3 SPM 模型

SPM 模型^[3]建立在 COST231-HATA 模型基础上,用于 150~2 000 MHz 频段的无线电波传播损耗预测。SPM 模型的数学表达式为:

$$P_L=K_1+K_2\times\lg(d)+K_3\times\lg(H_{\text{Txeff}})+K_4\times\text{DiffractionLoss}+K_5\times\lg(d)\times\lg(H_{\text{Txeff}})+K_6\times H_{\text{Rsdff}}+K_{\text{clutter}}\times f(\text{clutter}) \quad (7)$$

其中, K_1 表示与频率相关的因子,默认值为 12.4; K_2 表示距离衰减因子,默认值为 44.9; K_3 表示基站发射天线高度相关因子,默认值为 5.83; K_4 表示与衍射计算相关的因子,默认值为 0.4; K_5 表示与发射天线有效高度和距离相关的因子,默认值为 -6.55; K_6 表示移动终端高度相关因子,默认值为 0; K_{clutter} 表示地貌相关因子,默认值为 1; d 表示收发间的距离; H_{Txeff} 表示基站天线等效高度; H_{Rsdff} 表示移动台天线等效高度; Diffraction 表示衍射损耗; K_{clutter} 表示地貌相关因子; $f(\text{clutter})$ 表示发射点和接收点之间所经历的各种地貌类型的损耗。

由于通常使用的电子地图为 20 m 精度,各种地物精细程度不是很充分,绕射因子 K_4 和与 HTxeff 相关的 K_3 、 K_5 、 K_6 等系数难以准确校正。因此考虑到校正工作的效率和参数的影响,一般情况只对 K_1 、 K_2 、 K_{clutter} 值进行校正, K_2 ~ K_6 通常采用上述典型值,即 $K_3=5.83$ 、 $K_4=0.4$ 、

$K_5=-6.55$ 、 $K_6=0$ 。

2.4 SUI 模型

SUI 模型^[6](也称为 Erceg 模型^[2])主要基于 IEEE 802.16,是由 Stanford 大学提出的传播模型,其对应载波频率要求在 1 900 MHz 以上,早期主要以 WiMAX 为基础。在该模型中,针对不同的区域类型,SUI 模型分为 SUI A(路径损耗较高的密集市区)、SUI B(路径损耗适中的市郊)和 SUI C(路径损耗较低的乡村及平坦开阔区)。SUI 模型的数学表达式为:

$$P_L=A+10\gamma\times\lg(d/d_0)+X_t+X_h+s \quad (8)$$

其中,自由空间损耗 $A=20\lg(4\pi\times d_0/\lambda)$;路径损耗因子 $\gamma=a-bh_t+c/h_r$, a 、 b 、 c 的取值与区域类型密切相关。典型地,SUI A 模型中取值分别为 $a=4.6$, $b=0.0075$, $c=12.6$,SUI B 模型中取值分别为 $a=4$, $b=0.0065$, $c=17.1$,SUI C 模型中取值分别为 $a=3.6$, $b=0.005$, $c=20$; d 表示收发间的距离, d_0 为参考距离(100 m);频率修正因子 $X_f=6\lg(f/2\,000)$;针对 SUI A 和 SUI B 模型,接收天线高度修正项 $X_h=-10.8\lg(h_r/2\,000)$,针对 SUI C 模型,修正项 $X_h=-20\lg(h_r/2\,000)$; h_t 和 h_r 分别表示基站天线高度和移动台高度; $s=0.65(\lg(f))^2-1.3\lg(f)+\alpha$,SUI A 和 SUI B 中 $\alpha=5.2$ dB,SUI C 中 $\alpha=6.6$ dB。

2.5 COST231-WI 模型

COST231-WI 模型^[2]是在 COST231-HATA 基础上进行扩展,用于微蜂窝和小的宏蜂窝的一类传播模型,它适用于载波频率在 800~2 000 MHz 的情形。该模型更多考虑密集市区环境下的各种因素,如建筑物高度 h_{msd} 、街道宽度 w 、建筑物隔离度 b 以及道路方向与无线传播链路的角度 φ 。该模型分为视距和非视距两种情况。视距下该模型对应的数学表达式为:

$$P_L=42.6+26\lg(d)+20\lg(f_c) \quad (9)$$

其中, $d \geq 0.02$ km, f_c 为载波频率。

非视距下该模型对应的数学表达式为:

$$P_L=\begin{cases} P_{L_0}+L_{\text{rts}}+L_{\text{msd}}, & L_{\text{rts}}+L_{\text{msd}} > 0 \\ P_{L_0}, & L_{\text{rts}}+L_{\text{msd}} \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中, P_{L_0} 表示自由空间传播损耗,其对应的表达式为:

$$P_{L_0}=32.4+20\lg(d)+20\lg(f_c) \quad (11)$$

L_{rts} 表示屋顶至街道的绕射及散射损耗,其对应表达式为:

$$L_{\text{rts}}=-16.9-10\lg(w)+10\lg(f_c)+20\lg(\Delta h_m)+L_{\text{ori}} \quad (12)$$

其中, $\Delta h_m=h_{\text{msd}}-h_m$, h_m 表示移动台的高度; L_{ori} 是与道路方向相关的经验校正因子,即:



$$L_{\text{ori}} = \begin{cases} -10 + 0.354\varphi, & 0^\circ \leq \varphi \leq 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35), & 35^\circ \leq \varphi \leq 55^\circ \\ 4.0 - 0.114(\varphi - 55), & 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (13)$$

L_{msl} 表示载波经建筑物的多重屏蔽绕射损耗, 其对应表达式为:

$$L_{\text{msd}} = L_{\text{bsh}} + k_a + k_d \lg(d) + k_f \lg(f_c) - 9 \lg(b) \quad (14)$$

其中:

$$L_{\text{bsh}} = \begin{cases} 18 \lg(1 + \Delta h_b), & h_b > h_{\text{roof}} \\ 0, & h_b \leq h_{\text{roof}} \end{cases} \quad (15)$$

$$k_a = \begin{cases} 54, & h_b > h_{\text{roof}} \\ 54 - 0.8\Delta h_b, & d \geq 0.5, \quad h_b \leq h_{\text{roof}} \\ 54 - 0.8\Delta h_b d / 0.5, & d < 0.5, \quad h_b = h_{\text{roof}} \end{cases} \quad (16)$$

其中, $\Delta h_b = h_b - h_{\text{roof}}$, h_b 表示基站等效高度。

路径损耗因子 k_b 和频率损耗因子 k_f 分别为:

$$k_d = \begin{cases} 18, & h_b > h_{\text{roof}} \\ 18 - 15\Delta h_b / h_{\text{roof}}, & h_b \leq h_{\text{roof}} \end{cases} \quad (17)$$

$$k_f = \begin{cases} 0.7 \times ((f_c / 925) - 1), & \text{中等规模城市和郊区} \\ 1.5 \times ((f_c / 925) - 1), & \text{大型城市} \end{cases} \quad (18)$$

2.6 Ericsson 9999 模型

Ericsson 9999 模型^[7, 8]是 Ericsson 公司在传统 HATA 模型基础上所建立的一类传播模型。Ericsson 9999 模型的数学表达式为:

$$P_L = a_0 + a_1 \lg(d) + a_2 \lg(h_b) + a_3 \lg(h_b) \lg(d) - 3.2(\lg(11.75h_r))^2 + g(f) \quad (19)$$

其中, $g(f) = 44.49 \lg(f) - 4.78 (\lg(f))^2$; h_b 和 h_r 分别表示基站天线高度和移动台接收天线高度。

针对不同的地貌环境特点, 参数组 (a_0, a_1, a_2, a_3) 定义如表 3 所示。

表 3 环境与参数组对照

环境	a_0	a_1	a_2	a_3
城区	36.2	30.2	12.0	0.1
市郊	43.20	68.93	12.0	0.1
乡村	45.95	100.6	12.0	0.1

2.7 Volcano 模型

确定性模型主要采用射线跟踪模型, 而目前最典型的商用射线跟踪模型以 Volcano (“火山”) 模型、WaveSight 模型以及 WinProp 模型等为代表。限于篇幅, 本节以 Volcano 模型为例。Volcano 模型是由法国 Siradel 公司开发的包含

了射线追踪技术的确定性传播模型^[9]。它支持现有绝大部分技术 (如 GSM、CDMA、UMTS、TD-SCDMA、WiMAX、LTE 等), 其载波频率范围为 80 MHz~5 GHz。在该模型中, 传播场景根据天线高度和电波的主要传播方式定义为 3 种, 即发射天线高于建筑物的宏蜂窝场景, 发射天线低于周围建筑物的微蜂窝场景和发射天线介于两者之间的 mini 蜂窝场景。其中, 宏蜂窝场景模型是一种传统的垂直面模式传播模型, 用刀刃绕射算法计算垂直剖面上的绕射损耗。

针对市区、农村及室内定义了 3 类不同的传播模型。为了与其他模型进行对比, 仅给出市区的 Volcano 模型。针对不同的地貌特点, 又将市区的 Volcano 模型分为直射路径模型和多路径模型。对应的数学表达式分别为:

$$P_{L, \text{direct}} = EIRP \times L_{\text{free-space}} \times L_{\text{deygout}} \times G_e \times G_r$$

$$P_{L, \text{multi-path}} = EIRP \times L_{\text{free-space}} \times E_{\text{UTD}} \times L_{\text{deygout}} \times G_e \times G_r \quad (20)$$

其中, $EIRP$ 表示有效全向辐射功率; $L_{\text{free-space}}$ 表示自由空间传播损耗; L_{deygout} 表示 Deygout 衰减; G_e 表示发射天线增益; G_r 表示接收天线增益; E_{UTD} 表示场强 (射线穿越水平面场强-发射功率为 1 W 下的标准场强)。

其中直射路径模型主要考虑穿越障碍物的衍射损耗, 多路径模型主要考虑多路径的反射/衍射以及穿越障碍物的衍射损耗。

Volcano 模型由于对地图的支持, 对模型校正、穿透损耗等方面处理比较合理, 同时它自带相应的参数自动调整技术, 可以进一步调整预测的误差。

3 传播模型比较

基于上述面向 LTE 的传播模型的不同特点及要求, 首先给出在等价条件下的衰减损耗, 进一步地给出各个模型的对比情况。特别地, 由于 Volcano 模型是一类特殊的确定性模型, 采用特殊的处理技术及知识产权保密性等, 因此, 本文不做讨论与比较。

以典型的市区模型为例, 假定基站天线等效挂高为 30 m, 移动台等效高度为 1.5 m, 建筑物高度为 15 m, 频率为 2.6 GHz, 街道宽度为 25 m, 道路方向与无线传播链路的角度为 30° , 其余值均采用典型值, SPM 模型中市区的地貌损耗 $f(\text{clutter})$ 按照 12 dB 考虑。仿真结果如图 1 所示。

从图 1 可知, 不同模型所对应的衰减损耗存在较小的差异, 这主要是参数设置采用的均是默认经验值。尽管 Ericsson 9999 模型建立在 COST231-HATA 模型基础上, 但它的传播衰减损耗在默认值下是所有模型中最高的, 而

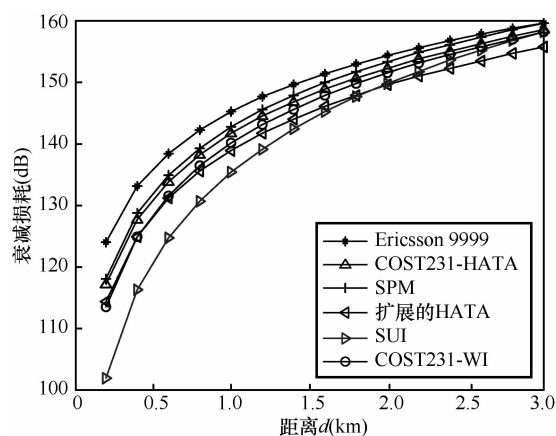


图 1 不同传播模型衰减损耗对比

COST231-WI 模型、COST231-HATA 模型、扩展的 HATA (SDR)模型、SPM 模型均是建立在传统 HATA 模型基础上的,它们对应的衰减损耗非常接近,同时相应的衰减损耗相对于 SUI 模型来说差异较大,SUI 模型随收发之间的距离增加,路损显著提升。

然而,由于各类模型均是经过经验或半经验统计所得出的,同时地物、地貌、默认参数值等各种因素的差异导致了各类模型存在一定的适用范围限制。因此,相应的理论模型比较并不能直接说明模型的优劣。进一步地,需要根据实际的地貌特点进行现场路测,利用路测数据对所采用的传播模型进行修正,以较为准确地反映实际环境下的衰减损耗,利用校正后的均值偏差与标准偏差(方差)等反映所采用模型的有效性。一般情况下,所采用的传播模型经过校正后的标准偏差应不大于 8,均值偏差接近于 0,在此基础上,还需结合路损情况、设备及天线的性能指标及准确度、校正的规划化参数设置、特殊地貌环境下相关因素的影响和合理设置、天气及测试环境如树叶遮挡等综合考虑和分析。最后,利用该准则可有效判定各类传播模型在特定环境下的优劣,进而最终确定采用最优的传播模型。

利用第 2 节的介绍及相关参考文献,可以归纳出上述

各类模型的参数对比及相应特征,如表 4 所示。其中表中的符号“√”和“×”表示各类传播模型的表达式是否考虑某项特性,即是否有相应的表达式加以定义。

结合 LTE 的特征与要求,从表 4 可知,扩展的 HATA 模型和 SUI 模型满足 LTE 对频率的要求,而其余模型尽管不满足频率的要求,但它们可以通过校正调整相关参数及地貌不同环境的 clutter 值将频率的影响加入进去。因此,它们也适合作为 LTE 传播模型的备选方案。

因此,基于上述的几类半经验模型及国内外模型选择情况,对于密集市区,考虑到地物环境特点(各种衍射与绕射、建筑物特征等因素),基站架设天线高度(部分位于建筑物之间或之下)等特殊性以及天线方位角与移动终端的具体关系等各种因素综合考虑,结合上述仿真和对比分析,在密集市区,LTE 拟采用模型则优选 SPM 模型、扩展的 HATA 模型及 COST231-WI 模型,一般城区则优选扩展的 HATA 模型和 COST231-WI 模型,郊区则优先扩展的 HATA 模型和 SPM 模型。以上仅从理论分析和对比的角度给出了相应的结论。显然,具体选择哪类模型还需要进一步地通过路测数据及模型校正,并结合实际的工程建设经验等多维角度进行综合考虑,通过校正后的结果对比最终确定最优的传播模型。传播模型校正的结果将直接决定 LTE 的业务信道或控制信道在满足有效解调下的覆盖范围。若校正后的各参数结果不合理,则覆盖范围将显著收缩或扩大,这将直接影响后续 LTE 仿真结果及网络规划的准确性和合理性。

4 结束语

本文结合 LTE 的特征与要求,归纳并总结了现有适合 LTE 的传播模型,并进行了详细的描述。在此基础上,对这些模型进行了对比分析和讨论,给出了 LTE 传播模型选择建议。传播模型校正的合理性除了与选择的模型有关外,还与实际的路测线路、站点选择、地貌环境、设备准确度及

表 4 不同传播模型对比

传播模型	适用频率 (MHz)	模型类型	区分视距 与非视距	具体建筑物 特征及街道	距离 d 分段考虑	基站与建筑物 高度关系	频率相关性
COST231-HATA 模型	500~2 000	经验	×	×	×	×	√
COST231-WI 模型	800~2 000	半经验	√	√	√	√	√
扩展的 HATA(SDR)模型	30~3 000	半经验	×	×	√	√	√
SPM 模型	150~2 000	半经验	×	×	×	×	×
SUI 模型	≥1 900	半经验	×	×	×	×	√
Ericsson 9999 模型	150~2 000	半经验	×	×	×	×	√

(下转第 126 页)