

# 5G室内综合穿透损耗测定方法探索

## Research on Measurement Method of 5G Indoor Comprehensive Penetration Loss

南作用, 钟志刚, 王尚奇(中讯邮电咨询设计院有限公司, 北京 100048)

Nan Zuoyong, Zhong Zhigang, Wang Shangqi (China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd., Beijing 100048, China)

### 摘要:

随着5G网络建设推进,室内及深度覆盖成为网络规划、设计的重心,以三维射线跟踪模型参数体系为基准,采用标准架设CW信源方式和扫频接收设备,并提出一种测试方法,得出某地综合测试结果,并与国外相关数据进行了对比,结果表明了该方法的科学性、合理性。

### 关键词:

仿真;5G;三维射线跟踪;穿透损耗;误差

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2022.02.009

文章编号:1007-3043(2022)02-0050-06

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Abstract:

With the development of 5G network construction, indoor and deep coverage has become the focus of network planning and design. Based on the parameter system of 3D ray tracing model, it adopts standard CW source mode and frequency sweeping receiving equipment, and proposes a test method to obtain the comprehensive test results of a certain place, and compares with the foreign relevant data, which shows that the method is scientific and reasonable.

### Keywords:

Simulation; 5G; 3D ray tracing; Penetration loss; Error

**引用格式:**南作用, 钟志刚, 王尚奇. 5G室内综合穿透损耗测定方法探索[J]. 邮电设计技术, 2022(2): 50-55.

## 1 概述

2019年6月6日,工信部向中国电信、中国移动、中国联通、中国广电发放5G商用牌照,标志着我国5G移动通信网络进入建设元年。对于5G网络而言,中国联通和中国电信主要采用3.5 GHz频段进行部署。该频段为移动通信近年开始使用的高频段,其空口损耗较现有频段更大,室内建筑体穿透损耗也更大,将进一步加大室内及深度覆盖的建设难度和成本。同时,随着5G网络建设的进展,网络建设方向逐步由室外宏

站覆盖向室内、深度覆盖转变。

随着移动互联网的快速发展,室内场景的业务占比越来越高。据统计,4G网络70%以上的业务发生在室内,业界预测未来5G网络超过80%的业务将发生在室内。此外,5G室内应用更加多样化,对网络也提出了更高要求,比如AR/VR、8K高清、智能工厂、远程医疗、远程教育等,这些业务主要发生在室内场景,对带宽、时延等方面的要求也更高。因此,与4G时代相比,室内5G的建设更加重要。

随着移动通信网络数字建模和仿真方法的发展,当前主流的5G网络规划仿真均采用高精度1~5 m三维数字地图,与三维射线跟踪模型配合,极大地提升

收稿日期:2021-12-02

了城市室外级别无线网络规划仿真预测的精度。而对于室内建筑预测采用统计方法进行评估, 引入更为精确的参数体系, 再辅以不同建筑类型, 借以提升室内信号的预测仿真精度。

本文基于三维射线跟踪模型和三维高精度地图, 重点针对室外宏站覆盖室内的场景, 提出了一种针对室内综合测试的方法和标准, 用以合理、便捷、快速地测定不同城市室内穿透损耗的参数体系, 提升 5G 网络规划方法的科学性和方案准确度。

## 2 问题引出

针对移动通信首次引入的 3.5 GHz 频段, 业内相关的覆盖研究和测试数据较少。目前多为针对具体建筑材质的穿透损耗值, 如表 1 所示。

表 1 室内穿透损耗测试数据(单位: dB)

测试场景	0.9 GHz	1.8 GHz	1.9 GHz	2.6 GHz	3.5 GHz	4.9 GHz
玻璃幕墙	9.08	9.88	10.72	12.20	14.85	16.58
砖混墙	12.91	15.75	15.93	16.60	22.01	22.56
室内隔断	16.22	21.28	21.91	22.30	23.05	24.95
钢混外墙	35.31	43.05	43.17	44.10	48.79	49.88

表 1 为实验室的常规建筑材质测试数据, 将其引入室内分布系统的仿真预测尚缺不同入射角下的电导系数, 无法精确地计算室分及微场景下的网络覆盖情况(限于本文范畴限定, 待再行讨论)。而针对室外宏站覆盖室内的场景, 还存在无线场景类别不对应的问题。表 2 和表 3 为规划仿真软件中针对穿透损耗的设定。

从表 2 和表 3 网络规划仿真参数体系可以看出, 常规实验室针对材质测试的数据往往基于建筑材质,

表 2 统计型模型室内穿透参数体系

Code	Name	Height/m	Indoor Loss/dB	4G/5G Model standard deviation/dB
1	High_Buildings	0		7
2	Ordinary_Regular_Buildings	0		7
3	Paralle_Regular_Buildings	0		7
4	Irregular_Large_Buildings	0		7
5	Irregular_Buildings	0		7
6	SubUrban	0		7
7	Village	0		7
8	Urban_OpenArea	0		7
9	SubUrban_OpenArea	0		7
10	High_speed_Railway	0		7
11	Railway	0		7

表 3 三维射线跟踪模型室内穿透参数体系

Propagation Class	Outdoor to Indoor Attenuation		Indoor to Outdoor Attenuation	
	Penetration Loss/dB	Linear Loss/(dB/m)	Penetration Loss/dB	Linear Loss/(dB/m)
Elevated Open				
Trees				
Buildings type 1	0	0	0	0
Buildings type 2	0	0	0	0
Buildings type 3	0	0	0	0
Bridge				

如玻璃、木墙、砖混等, 而网络规划仿真中往往基于地物类型或建筑体类型, 对象维度和级别均存在较大差异, 无法直接应用。而链路预算中确定的场景分类往往基于无线环境, 如密集城区、城区等, 理论上密集城区为建筑体基础上更为宏观层面的聚合, 实验室针对材质精确测试数据难以直接使用。现仅以不同建筑体中不同玻璃材质(玻璃窗户)占整体建筑比例影响穿透损耗情况来说明穿透损耗差异, 如图 1 所示。

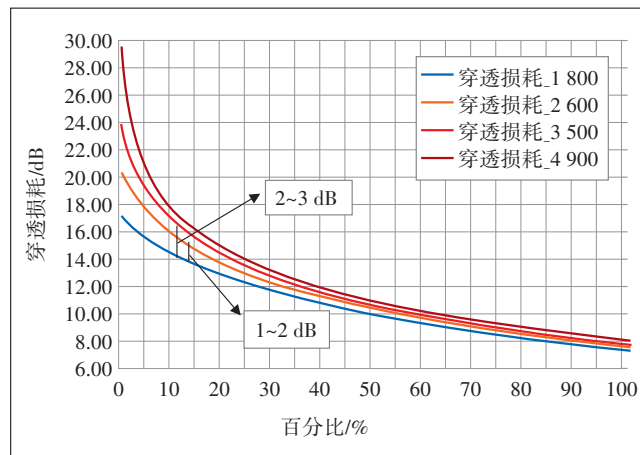


图 1 建筑体窗户占总体面积对穿透损耗的影响

同时, 可以看到针对基于三维射线跟踪模型的参数体系, 更无法通过实验室测试得出。目前国内仿真规划中该块参数一般基于三维射线跟踪模型默认参数进行设定, 该默认参数基于欧洲低频段测试数据得出, 因此给整个仿真带来较大误差和不确定性。为此, 需要探索一种针对三维射线跟踪模型参数体系的室内穿透参数测定方法, 满足网络规划仿真、链路预算更为精确的应用。

## 3 理论及方法分析

目前, 规划仿真中的三维射线跟踪模型中采用了

更为精确、科学的算法,其计算原理如图2所示。

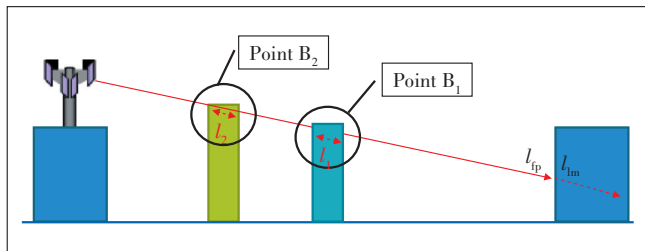


图2 三维射线跟踪模型计算原理示意图

$$L_{\text{Penetration}} = \sum_{\text{Points B}} l_{\text{fp}}(B_{\text{pclass}_i}) + l_{\text{lm}}(B_{\text{pclass}_i}) \times l_i \quad (1)$$

式中:

$B_{\text{pclass}}$ ——B点所处建筑物分类级别

$l_{\text{fp}}$ ——B点所处建筑物的首层建筑体穿透损耗 (dB)

$l_{\text{lm}}$ ——线性室内步进穿透损耗系数 (dB/m)

$l_i$ ——室内穿透距离 (m)

同时针对移动通信中的电磁传播场景路线,当传播路线穿越建筑体,也应考虑相关的穿透损耗,如图2中  $B_1$  点所示情况。

对于建筑体级别  $B_{\text{pclass}}$ ,常规三维射线跟踪模型中目前设定3~5个级别,每种级别分别对应一组  $l_{\text{fp}}$  和  $l_{\text{lm}}$ ,在具体规划仿真像素计算时针对电磁传播路径进行分析、调用、计算。而建筑体是在对仿真区域中所有建筑物进行统计分类的基础上定义的统计意义上的

实体,与实验室材质测试相异,故在场景分类的基础上确定建筑分类级别,具体如表4所示。

同时,针对链路预算方法,可采用如图2所示参数体系进行穿透损耗的计算,即通过单层墙体穿透损耗与每米步进损耗确定链路预算中使用的室内浅层穿透覆盖。但须定义浅层覆盖室内距离,建议按照5~10 m,采用式(1)计算方法进行即可。

表5给出了仿真与链路预算方法中不同类别地物分类及场景定义。采用表4和表5分类方法和标准对室外宏站覆盖室内进行了系统的统一和对应,最终的问题在于如何进行相关参数的测定。与常规的材质测试相异,本文定义该测试为基于建筑场景分类的综合穿透测试,主要对城市或规划仿真区域的建筑体进行基于建筑体形状、高度、材质等特征的分类,在分类的基础上按照参数要求范畴和定义进行测定。

#### 4 室内穿透综合测定方法

室内穿透综合测定方法主要针对5G网络核心频段,基于三维射线跟踪模型参数体系,采用统计分析方法,对区域内的建筑体进行综合评定测试,如图3所示。

第1步:确定某城市无线环境典型分类区域范围,无线环境按照如下标准进行分类。

a) 核心城区:建筑物平均高度通常在20 m以上(7层以上),高楼林立;电磁传播隧道效应明显,长路时

表4 不同类别地物分类及定义

地物类型(地图)	仿真模型算法分类	精度/m	室内测试场景分类
SubUrban_OpenArea/Road_Area/ Green Land	Open	1~5	主要为农村区域居民住宅
Vegetation/Urban_OpenArea/Avenue	Trees	1~5	-
High_speed_Railway/Railway	Elevated Open	-	-
Irregular_Large_Buildings/Irregu- lar_Buildings/Houses	Building Type 1	1~5	主要针对以玻璃、简易材质、薄层砖混等为主体的低矮建筑群,建筑体内结构相对简单,多为城中村、简易房、单体(如绿化带建筑设施、低层落地窗小区)、开阔型的会场(足球场等)等
Paralle_Regular_Buildings/Commer- cial	Building Type 2	1~5	主要针对以薄层钢筋混凝土、砖混等为主体的中层、不规则建筑群,建筑体内结构相对复杂,多为中高层飘窗住宅、普通中小学学校、商务楼宇(普通酒店等)、街道两边小商铺/门面房、体育馆等
High_Buildings/Ordinary_Regu- lar_Buildings/Skyscraper	Building Type 3	1~5	主要针对以厚层混凝土等为主体的高层、规则大型建筑体,多为高档商场、高档住宅小区、5A酒店、大学教学楼/图书馆等,建筑内结构和隔断复杂
Roads	Bridge	1~5	-
Village//Dense_Avenue/Forest/ Wet_Land/Park	Mixed Vegetation	20	-
Suburban	Sparse Buildup	20	-
Dense Urban	Dense Buildup	20	-
Water/Sea	Water	-	-



表5 仿真与链路预算方法中不同类别地物分类及场景定义

仿真模型算法分类	室内测试场景分类	链路预算分类
Open	主要农村区域农村居民住宅	农村/交通线
Trees	-	-
Elevated Open	-	-
Building Type 1	主要针对以玻璃、简易材质、薄层砖混等为主体的低矮建筑群, 建筑体内结构相对简单, 多为城中村、简易房、单体(如绿化带建筑设施、低层落地窗小区)、开阔型的会场(足球场等)等	郊区
Building Type 2	主要针对以薄层钢筋混凝土、砖混等为主体的中层、不规则建筑群, 建筑体内结构相对复杂, 多为中高层飘窗住宅、普通中小学学校、普通酒店等商务楼宇、街道两边小商铺/门面房、体育场馆等	城区
Building Type 3	主要针对以厚层混凝土为主体的高层、规则大型建筑体, 多为高档商场、高档住宅小区、5A 酒店、大学教学楼/图书馆等, 建筑内结构和隔断最为复杂	密集城区
Bridge	-	-
Mixed Vegetation	-	-
Sparse Buildup	-	城区
Dense Buildup	-	密集城区
Water	-	-

延明显, 密集车流引起的反射及频偏较为严重, 信号几乎不可能从建筑物屋顶绕射传播。

b) 城区: 建筑物平均高度通常在 10~20 m (3~7 层), 建筑密集; 街道宽敞, 移动环境造成反射及频偏效应普遍; 建筑高度通常低于引起衍射的高度。

c) 郊区: 建筑物平均高度通常在 5~10 m (2~3 层), 建筑较为集中; 有低矮植被或树木; 车流密度较高。

d) 农村: 建筑物平均高度通常在 2~5 m (1~2 层), 建筑分区域集中或零落; 地形起伏; 可能有低矮植被或森林; 车流一般较少。

第 2 步: 在某类无线环境区域内, 按照如下方式进行特定、典型的建筑体确定:

a) 建筑穿透特质类型 1: 整个城市内损耗最低档位等级, 主要针对以玻璃、简易材质、薄层砖混等为主体的低矮建筑群, 建筑体内结构相对简单, 多为城中村、简易房、单体(如绿化带建筑设施、低层落地窗小区)、开阔型的会场(足球场等)等。

b) 建筑穿透特质类型 2: 整个城市内损耗中等档位等级, 主要针对以薄层混凝土、砖混等为主体的中层建筑群, 建筑体内结构相对复杂, 多为中高层飘窗

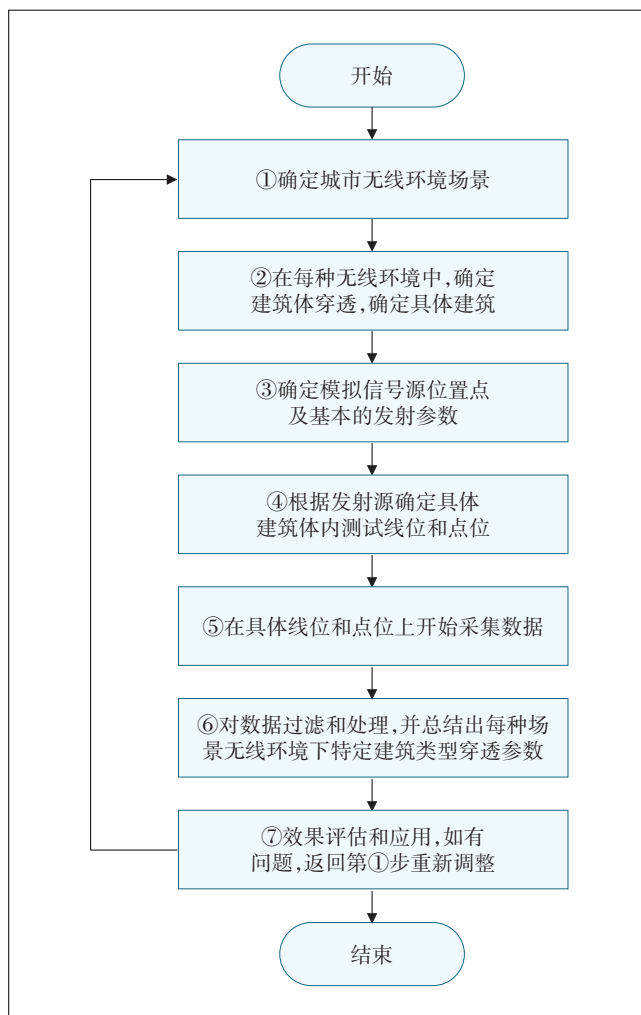


图3 室内穿透综合测定方法流程

住宅、普通中小学学校、商务楼宇(普通酒店等)、街道两边小商铺/门面房、体育场馆等。

c) 建筑穿透特质类型 3: 整个城市内损耗高等档位等级, 主要针对以厚层混凝土、砖混等为主体的高、大建筑体, 多为高档商场、酒店、大学教学楼/图书馆等, 建筑内结构和隔断复杂。

要求每类无线环境下, 确定的建筑体数量应至少 100 栋, 尽可能多, 以满足统计特征; 要求建筑体满足典型性、代表性及完备性特征。

第 3 步: 每种无线网络环境下, 在建筑体分布的核心区域或附近, 架设 CW 发射机, 频点按照 5G 网络核心频点 3.5 GHz, 带宽设定 10 kHz, 记录其位置, 包括: 发射点 ID、名称、经度、纬度和发射功率。

第 4 步: 在每栋建筑体内, 根据三维射线跟踪传播模型和统计特征的相关要求, 确定如下建筑体参数体系。

a) 单层建筑体的穿透。该参数主要表征电磁波穿越建筑体第1层墙引起的电波损耗,单位为dB。

b) 建筑体内步进损耗:主要由建筑体内结构等引起的统计意义上的步进损耗,单位为dB/m,这里需要强调,该方式下建筑体内结构、材质、厚度等不做详细的计算考虑,只做统计意义上的区分,该方式的处理满足室外宏站仿真对室内覆盖的定位。

c) 测试点位选取:针对室内每个测试点位,相隔3m,按照A、B、C……线进行分组线;组线内,0点表示室外,1点表示室内第1测点位,2表示室内第2测点位,以此类推,选取的点位应在建筑体内均匀分布,不再考虑建筑体内的结构、材质、厚度等因素。

d) 测试线位:所有建筑按照上述方式进行线位,线位选取应涵盖尽可能多的建筑室内典型结构特征,多层建筑与单层均匀涵盖。

e) 要求线位矢量方向沿着发射机电波向外的方向确定。

第5步:按照如上确定的点位和线位进行逐点测试,要求每个点位测试3min,按照如表6所示格式记录数据。

表6 接收点测试信息记录

测点ID	发射点ID	建筑体名称	建筑体分类	建筑体线编号	建筑体点编号	接收电平/dBm	备注
-	-	-	-	-	-	-	-

第6步:按照如下原则对数据进行过滤及处理。

a) 室内比室外差(穿墙或门、窗)。

b) 越往室内行进,接收电平应减少的普遍适用规律。

c) 对数据测点出现明显突变进行过滤;对3min之内的数据进行平均,以期得到正常的慢衰落特征。

d) 对过滤处理后的基本数据,用如下方式计算:

$$D_{0m} = \sum_{i=1}^n (d_{i1} - d_{i0}) / n \quad (2)$$

$$D_{1m} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (d_{i(j+1)} - d_{ij}) / n / m \quad (3)$$

式中:

$D_{0m}$ ——首次穿透基本损耗平均值(dB)

$D_{1m}$ ——进入墙体后每米递进损耗平均值(dB/m)

$d_{i1}$ ——某线第1点位接收电平值(dBm),代表进入室内后第1点为接收电平值

$d_{i0}$ ——某线第0点位接收电平值(dBm),代表室外接收电平值

$d_{i(j+1)}$ ——某线第j+1点位接收电平值(dBm),代表进入室内后第j+1点为接收电平值

$d_{ij}$ ——某线第j点位接收电平值(dBm),代表进入室内后第j点为接收电平值

$n$ ——某一场景或总的测试线位

$m$ ——某一场景或总的测试点位

第7步,对基于以上算法输出的结果按照城市无线场景进行统计平均处理,最终得到如表7所示结果。

表7 穿透损耗结果记录

序号	城市	无线环境场景分类	5G频段/MHz	首层建筑穿透损耗/dB			首层建筑穿透损耗步进/(dB/m)		
				类型1	类型2	类型3	类型1	类型2	类型3
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## 5 室内穿透综合测试案例

按照第4章所述方法,对某城市密集城区场景进行了室内综合穿透损耗测定。

### 5.1 测试环境及系统参数

选取的测试环境周边包括大型商场、高档酒店、学习以及写字楼。CW发射机的参数如表8所示。

表8 CW发射参数

参数	取值	参数	取值
功率/dBm	43	天线增益/dBi	6
发射中心频点/MHz	3 500	接收天线增益/dB	0
发射窄带信号/kHz	10	-	-

### 5.2 测试数据及结果

各测点线位点测试数据情况及对不同频段室内综合穿透损耗的测定结果如表9所示。

需要说明的是,室内综合穿透参数的测定与电磁传播模型的校正相类似,测试的场景、楼宇的选择对测定结果影响较大,须更加关注测试楼宇选择的典型性和代表性;另外基于统计的方法对楼宇、线位、点位、测试数据量等也有一定要求,最终取定更为合理、贴近的工程设定值。

### 5.3 测试结果评估

通常情况下,同频段国内外不同城市无线环境

表9 室内综合穿透损耗的测定结果

项目	900 MHz	1 800 MHz	2 600 MHz	3 500 MHz	
测量场景	办公楼、商场、学校、酒店、商铺、居民区、高档小区				
测点/点	6 287 787	6 190 800	6 048 526	4 912 006	
测试数据文件/MB	473	466	458	371	
数据净测试总时长/s	24 007	23 710	23 087	18 839	
第1层墙体穿透损耗/dB	建筑类型2	9.2	11	12.14	14.52
	建筑体类型1	2.5	6.05	6.73	7.57
	建筑体类型3	11.7	13.91	15.07	19.17
室内损耗步进/(dB/m)	建筑体类型2	0.65	0.85	1	1.49
	建筑体类型1	0.44	0.36	0.61	0.91
	建筑体类型3	0.76	1.37	1.42	2.62

下,室内综合穿透参数量级接近,但有一定差异,为此找到国外相关三维射线跟踪模型已有900 MHz对应的某建筑类型参数,具体对比情况如表10所示。

表10 室内穿透损耗结果评估分析

取定建筑类型2	欧洲900 MHz测定值	本方法900 MHz测定值
第1层墙体穿透损耗/dB	9.00	9.20
室内损耗步进/(dB/m)	0.60	0.65

从表10可以看出,本方法基本科学、合理,测定的工程设置值接近,有一定的差异性。

在具体无线网络规划仿真方案中的预测结果如图4所示。



图4 5G RSRP 仿真预测效果图

图4中左侧为采用传统穿透损耗的预测结果,右侧为采用三维射线跟踪模型参数体系下的预测结果。明显看到电磁传播室内快速衰减的趋势,并在一定范围内,满足部分建筑体5G网络覆盖。而左侧预测图,只要有建筑体的区域,内部覆盖存在明显的信号衰落。右侧预测图与实际网络信号的趋势和特征更为契合。

## 6 总结

本文基于5G网络业务场景和应用要求,以5G网络高精度预测仿真为目标,引入更为精确的室内、

深度覆盖预测参数体系,给出了科学、合理的测定方法,并与国外相关指标进行了对比,验证了该方法的合理性和准确性,给出特定城市简要的工程参数设定值。但具体到室内、深度覆盖仿真时,建议结合模型校正,对室内综合穿透进行测试和校正,以期满足5G ToC/ToB等高要求方案更深、更好、更精的预测。

## 参考文献:

- [1] 移动通信基站工程技术规范:YD/T 5230-2016[S].北京:北京邮电大学出版社,2016:9-19.
- [2] 电磁环境控制限值:GB 8702-2014[S].北京:中国环境科学出版社,2014:3-4.
- [3] 姚颖,武攀峰,陆炜.移动通信基站架设方式对地面电磁辐射分布的影响[J].环境监测管理与技术,2016,28(6):64-67.
- [4] 李新.基于5G超密集组网的规划与设计[J].电子测试,2018(4).
- [5] FORSK. Atoll User Manual Radio 3.4.0 [EB/OL]. [2021-12-13]. <https://downloads.forsk.com/atoll-34.html>.
- [6] FORSK. Atoll User Manual Microwave 3.4.0 [EB/OL]. [2021-12-13]. <https://downloads.forsk.com/atoll-34.html>.
- [7] FORSK. Model Calibration Guide 3.4.0 [EB/OL]. [2021-12-13]. <https://downloads.forsk.com/atoll-34.html>.
- [8] FORSK. Technical Reference Guide Radio 3.4.0 [EB/OL]. [2021-12-13]. <https://downloads.forsk.com/atoll-34.html>.
- [9] FORSK. Technical Reference Guide Microwave 3.4.0 [EB/OL]. [2021-12-13]. <https://downloads.forsk.com/atoll-34.html>.
- [10] FORSK. SPM Model Calibration [EB/OL]. [2021-12-13]. <https://downloads.forsk.com/technotes>
- [11] FORSK. Multi Technology LPWA Station Template. [2021-12-13]. <https://downloads.forsk.com/technotes>
- [12] 袁建国.自由空间模型损耗计算详细说明[EB/OL]. [2021-12-13]. <https://blog.csdn.net/u012977050/article/details/78487875>.
- [13] High Performance Propagation Model Technical Reference Guide Version 2.8.0 [EB/OL]. [2021-12-13]. <https://downloads.forsk.com/technotes>.
- [14] Study on 3D channel model for LTE: 3GPP TR 36.873 [S/OL]. [2021-12-13]. <http://www.3gpp.org>.
- [15] LTE: 5G; Study on channel model for frequency spectrum above 6 GHz : 3GPP TR 38.900 [S/OL]. [2021-12-13]. <http://www.3gpp.org>.
- [16] Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz: 3GPP TR 38.901 [S/OL]. [2021-12-13]. <http://www.3gpp.org>.

### 作者简介:

南作用,高级工程师,主要研究方向为移动通信网络建模仿真及基础研究、卫星通信、微波/短波等;钟志刚,中讯邮电咨询设计院有限公司总工程师,教授级高级工程师,主要从事微波通信、卫星通信和移动通信领域的工程咨询、规划、设计和研究等工作;王尚奇,毕业于交通大学,高级工程师,硕士,主要从事无线网络技术研究、无线网络规划、无线网络仿真等工作。