

文章编号: 2095-2163(2020)07-0194-05

中图分类号: TP316.81;TP311.1

文献标志码: A

# 基于超声波层析技术的烟气检测

白海龙, 李保生, 王新飞

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009)

**摘要:** 超声层析成像由X射线层析成像技术引申而来,用这种成像方法可获得声速、声衰减系数、声散射系数及非线性参量等的定量图像。基于此理论,本文提出了一套烟气超声层析成像装置。系统通过上位机控制步进电机与超声波发射/接收单元,实现了自动化装置校准、数据采集、信号调理和图像重建过程。在传统线阵式检测阵列的基础上,创新了环绕式探头的布置方法,使得图像重建时获得的走时数和超声波数目大大增加,提高了测量的精确性。选择SIRT算法进行图像重建,根据最速下降原理对SIRT算法进行优化,通过对重构图像的对比,发现优化以后的SIRT算法重建图像质量更好,重建速度更快。

**关键词:** 超声层析; 信号调理; 环绕式; 最速下降

## Smoke detection based on ultrasonic chromatography

BAI Hailong, LI Baosheng, WANG Xinfei

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**[Abstract]** Ultrasonic tomography is an extension of X-ray tomography. With this method, quantitative images of sound velocity, sound attenuation coefficient, acoustic scattering coefficient and nonlinear parameters can be obtained. Based on this theory, a set of ultrasonic tomography equipment for flue gas is proposed in this paper. The system controls the stepper motor and the ultrasonic transmitting / receiving unit by the upper computer to realize the process of automatic device calibration, data acquisition, signal conditioning and image reconstruction. On the basis of traditional linear array detection array, the layout method of surround probe is innovated, which greatly increases the travel time and ultrasonic number obtained during image reconstruction, and improves the measurement accuracy. SIRT algorithm is selected for image reconstruction. Based on the fixed step size SIRT algorithm, the SIRT algorithm is optimized according to the steepest descent principle. By comparing the reconstructed images, it is found that the optimized SIRT algorithm has better reconstructed image quality and faster reconstruction speed.

**[Key words]** Ultrasonic tomography; Signal conditioning; Surround; Steepest descent

## 0 引言

火灾现场、大雾天气、矿井等由于烟气的原因导致能见度低,无法获知内部的物体图像,进而导致危险源远程监测与报警、煤矿与消防应急救援、生命侦测、救护人员体质特征检测、安全防护等相应的救援活动无法展开。因此,亟需一种在烟气的环境下能够获取物体图像的方法。基于上述需求,本文介绍的烟气超声层析装置,主要应用于火灾现场、大雾天气等能见度较低的场所,对相关行业的发展有重要的借鉴作用。

## 1 烟气超声层析成像系统结构

### 1.1 烟气超声层析成像系统成像原理

烟气超声层析成像系统装置原理如图1所示。该装置由超声波发射阵列、超声波接收阵列、烟气发生器、旋转台、超声波信号驱动电路、示波器、信号处理电路以及客户端等几部分组成。超声波发生阵列和接收阵列分别进行超声波信号的发射和接收;烟气发生器主要用来产生实验所需要的烟气;旋转台

对超声波发射(接收)阵列进行旋转,以便于观察超声波信号在空间的分布<sup>[1]</sup>;超声波信号驱动电路用来控制超声波发射阵列和接收阵列;示波器用来观察最原始的超声波信号;信号处理电路对初始信号进行放大,对无用的信号进行过滤,挑选出具有代表性的超声波信号,可以在上位机上观察成像的具体情况。

假设该旋转台静止不动时,超声波发射阵列发出超声波信号到接收阵列,若将超声波发射阵列到接收阵列的路径记为 $AB$ ,超声波信号记为 $f(x)$ ,则由超声波发射阵列到接收阵列间的超声波信号表示为 $f(x)$ 到 $AB$ 上的积分<sup>[2]</sup>,即 $\int_A^B f(x) dx$ 。若旋转台开始旋转,将旋转角记为 $\alpha$ ,则超声波信号 $f(x)$ 在旋转空间内可表示为: $\int_0^\alpha \left[ \int_A^B f(x) dx \right] d\alpha$ 。将超声波信号传送到示波器,可观察超声波信号的实时波形。经信号处理电路处理以后,通过成像算法,在上位机上可以清楚的看到烟气内部物体的影像。

**作者简介:** 白海龙(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向:机器视觉与光电检测技术。

**收稿日期:** 2020-04-21

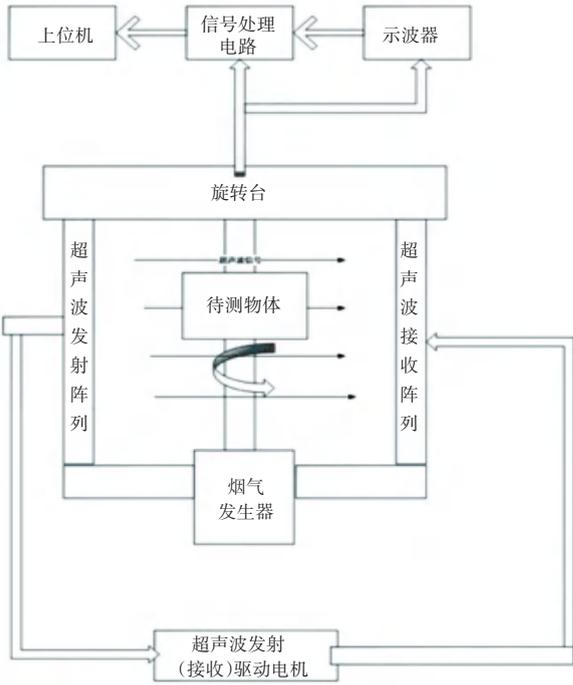


图 1 系统原理图

Fig. 1 System schematic diagram

## 1.2 烟气超声层析阵列的检测方法

### 1.2.1 整体结构

针对烟气超声层析成像检测中数据提取较为困难,本文提出了一种新的阵列检测方法。系统由超声发射接收电路、信号采集、控制电路、信号处理与显示部分组成。计算机是系统的核心,它通过控制电路把整个系统联系起来。

### 1.2.2 探头阵列的布置

探头的个数由测试件的大小、测量精度、网格划分情况等因素决定。当阵列中的一个探头为发射探头时,其他探头构成接收探头阵列,控制电路中的阵列开关控制探头依次作为发射探头,超声波经接收电路将信号送 A/D 进行转换,最后在计算机中进行特征提取、降噪处理、重建,完成层析成像。

## 1.3 烟气超声层析成像系统成像步骤

超声层析成像系统成像流程图,如图 2 所示。包括如下步骤:

(1) 建立数据库,数据库包括环境温度、烟气浓度、发射超声波信号的频率。环境温度和烟气浓度与发射超声波信号的频率一一对应;

(2) 将发射阵列和接收阵列分别设置在待测物体的两侧,发射阵列的发射探头和接收阵列的接收探头一一对应;采集待测物体所在的环境温度和烟气浓度并输入到步骤(1)中的数据库,获取与该环境温度和该烟气浓度对应的超声波信号的频率,用

于向待测物体发射,记为频率为 A 的超声波信号;

(3) 发射阵列和接收阵列围绕待测物体同步旋转;或者发射阵列和接收阵列固定设置,待测物体自转;发射阵列中的各个发射探头均向位于烟气环境中的待测物体发送频率为 A 的超声波信号;与各个发射探头相对应的各个接收探头获取穿过待测物体之后的超声波信号;

(4) 将各个接收探头获取的穿过待测物体后的超声波信号输入到层析成像算法中,获取位于烟气环境中的待测物体的图像。

步骤(1)中的建立数据库的具体步骤如下:

I. 若试验图像与试验物体的图像相吻合,则保存步骤(4)中的超声波信号的频率,并保存与步骤(4)中的频率对应的步骤(2)中的环境温度和烟气浓度;

II. 改变环境温度和烟气浓度,重复(2)-(5),直至建立数据库。

步骤(3)中的各个发射探头向待测物体发送频率为 A 的超声波信号为滤波之后的超声波信号  $f(x)$ , 公式(1),用于减少超声波信号中的交流信号。

$$f(x) = (1 - k - d) * f(x_0) + c. \quad (1)$$

其中:  $k$  为待测物体对超声波的吸收率;  $d$  为发射探头与接收探头之间的距离;  $f(x_0)$  为超声波初始时刻的电压值;  $c$  为常数。

烟气浓度为单位体积内烟气的质量。位于发射阵列首尾两端发射探头之间的距离大于待测物体沿发射探头排列方向的长度。

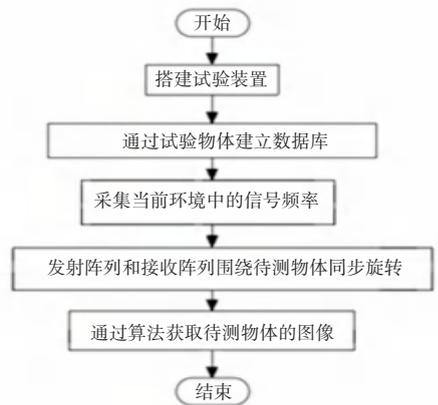


图 2 系统流程图

Fig. 2 System flowchart

## 1.4 烟气超声层析成像系统数据处理

超声波在烟气中的传播方式和在空气中的传播方式相近,大致沿直线传播,且衍射弱。基于这种情况:本文采用射线追踪法和 SIRT 重建算法,来实现

烟气环境中的超声波层析成像,该方法分为向前处理与向后处理二部分:

(1)向前处理:先计算离散网格模型上所有边界点的最小走时,然后计算发射点单元所在列各单元边界上所有离散点的最小走时,并记录对应的次级源,接着对发射点单元所在行各单元边界上所有点计算,方法相同。在求出每网格内局部走时的基础上,对发射源发出的射线在整个模型上的走时相加,便得到全局最小走时<sup>[3]</sup>。

(2)向后处理:根据向前处理中得到的各单元边界上所有计算点的最小走时及相应次级源,追踪所有发射点到接收点间具有最小走时的射线路径。首先,求出接收点所在单元边界上走时最小的离散点,以走时最小的离散点为新的接收点,重复上一步骤向前推,直到发射点所在单元为止。其次,将发射点与最后的射线交点相连,即完成全部向后处理。

基于 LTI 算法的速度重建流程图如图 3 所示。

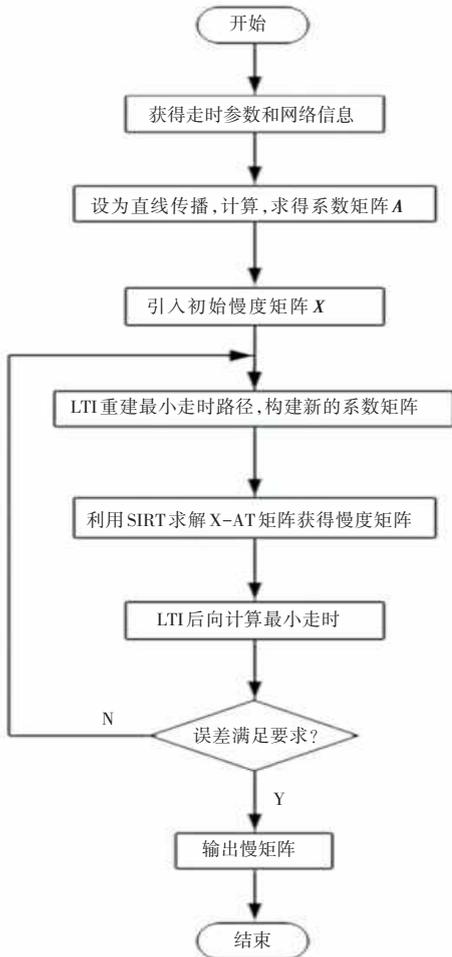


图 3 基于 LTI 算法的速度重建流程图

Fig. 3 Speed reconstruction flow chart based on LTI algorithm

(3)层析结果

图 4 为固定步长的 SIRT 算法图像。

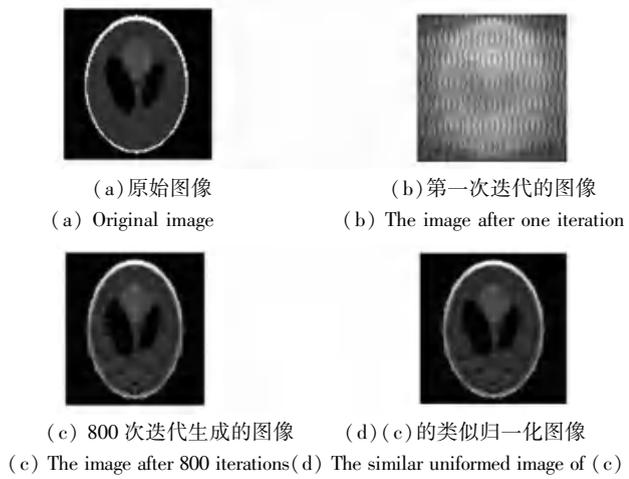


图 4 固定步长的 SIRT 算法图像

Fig. 4 Fixed step size SIRT algorithm image

图 5 为采用最速下降原理对迭代步长进行优化以后的 SIRT 算法图像。

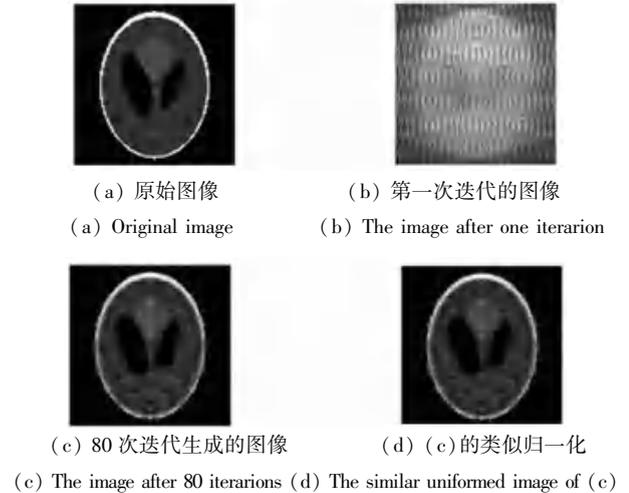


图 5 采用最速下降原理优化后的 SIRT 算法图像

Fig. 5 The image of SIRT algorithm optimized by steepest descent principle

由上图 5(d) 可以看出,采用最速下降原理对迭代步长进行优化以后的 SIRT 算法明显优于固定步长的 SIRT 算法。

### 1.5 实验结果分析

图 6 为烟雾浓度 1 000 ppm 下的图像。图中黑点集中处为待测物在烟气中的位置,从图 6 可以看出是一个近似的圆孔形状。右上部分与左下部分相比,黑点比较多,说明该环境下烟气具有流动性,且分布不均匀,右上部分烟气浓度较大。

图 7 为烟雾浓度 500 ppm 下的图像。图 13 黑点集中处为待测物在烟气中的位置,其形状与待测物接近。除黑点集中处的其他位置黑点密度大体近似,说明该环境下烟气分布较均匀,依此可判断待测物在烟气中的位置及形状。

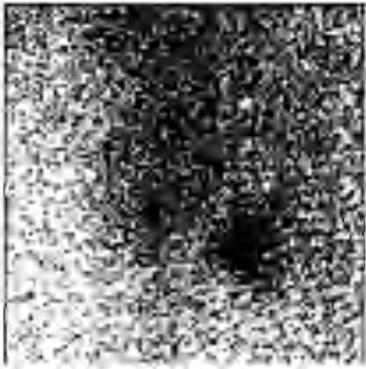


图6 烟雾浓度 1 000 ppm 下的图像

Fig. 6 Image of smoke concentration at 1 000 ppm

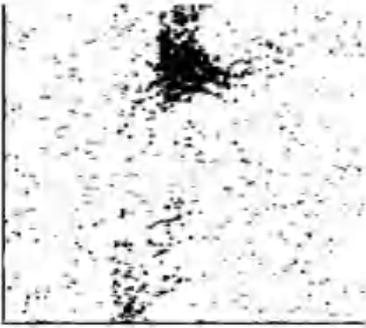


图7 烟雾浓度 500 ppm 下的图像

Fig. 7 Image of smoke concentration at 500 ppm

## 2 烟气超声层析成像系统参数分析

### 2.1 旋转平台的旋转角度

为了获得烟气环境中未知物体的三维图像,需要将试验台在空间上沿中心轴线旋转一定的角度,记为 $\theta$ ,对超声波信号在二维空间的函数模型在 $0 \sim \theta$ 上积分,即可获得三维函数模型<sup>[4]</sup>。

### 2.2 超声波信号的衰减度

声波在介质中传播时,其强度往往随着传播距离的增大而减小。广义而言,超声波的衰减可定义为超声波能量重新分配或改变的过程,主要可分为两种情形:

(1)声吸收。超声波在介质中传播时,其能量有动能和弹性势能两种形式,这两种形式相互转换,能量保持不变<sup>[5]</sup>。实际上多数介质不是纯弹性介质,各点的点声压和质点速度之间存在弛豫现象,二者不同相,声能转化为其他形式的能量。吸收机理是十分复杂的,它不仅由粘滞性引起,而且还与许多复杂的物理、化学弛豫过程及热传导有关,总的声吸收为各个弛豫过程造成的声吸收的线性叠加。

(2)声散射。声波在传播过程中遇到两种介质的交界面,会发生反射、散射和折射现象,引起能量的再分布。声波在尺度远大于波长的界面上会发生反射和折射,在界面尺度远小于波长时,会发生散射

现象,在界面尺度与波长接近时会发生衍射现象,这些通称为散射现象。这些过程都使原入射波的传播方向发生改变,使得超声能量在空间上重新分配。

### 2.3 超声换能器主要参数选择

超声换能器是一种将电磁能转化为机械能(声能)的装置,通常由压电陶瓷或其它磁致伸缩材料制成。超声波换能器有多种类型,如电声型超声波换能器(包括压电换能器,磁致伸缩换能器),电动式和电磁式换能器,流体动型换能器(包括气流激励的振腔哨,旋涡哨,旋笛,圆板哨及流体喷注激励的簧片哨)等<sup>[6]</sup>。本文采用的是 $64 * 64$ 的超声波发射(接收)阵列,该阵列超声波探头的实物图如图8所示。

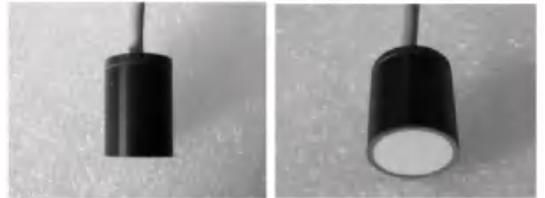


图8 超声换能器实物图

Fig. 8 Physical picture of ultrasonic transducer

主要参数如下:

名称:200 KHz 超声波换能器

型号:DA-200-01BLJZ

频率:200 KHz $\pm$ 5%

量程:0.10~1.5 m

最小阻抗:2 500  $\Omega \pm 20\%$

电容量:400 pF $\pm$ 20% @ 1 KHz

工作电压:峰值电压<1 000 VPP

工作温度:-40~+80  $^{\circ}$ C

压力: $\leq$ 3Mg 或者 0.3 MPa

尺寸:12 \* 17

防护等级:IP68

重量:8 g $\pm$ 5%(线长:25 cm)

### 2.4 层析成像分辨率

分辨率即所成图像的精密度,是指图像所能显示的像素的多少。图像可显示的像素越多,图像就越精细,同样大小的图像能显示的信息也越多,所以分辨率是衡量图像质量非常重要的性能指标之一。分辨率的高低会直接影响成像质量,分辨率越高,成像质量越好。

## 3 结束语

本文的超声波烟气层析成像的方法,在实际应用中具有以下优势:

- (1)能够准确获知烟气环境中的真实场景;
- (2)通过算法改进,提高了获取图像的质量;

(3)有效的降低了纹波系数,使信号更容易处理,提高了图像质量;

(4)使用超声波信号进行探测,指向性好、对人体无害、便于携带、无辐射性、准确、可连续动态及重复扫描,因此易于推广应用;

(5)采用超声波作为信号源,可以提高获取的烟气环境中物体图像的清晰度。

## 参考文献

[1] 郝晓辉. 三维医学超声成像系统的研究[D]. 北京:清华大学,

1999.

[2] 沈建国.应用声学基础:实轴积分及二维谱技术[M]. 天津:天津大学出版社,2004.

[3] 徐立中,李士进,石爱业. 数字图像的智能信息处理[M]. 北京:国防工业出版社,2007.

[4] 高上凯,高小榕,张志广,等. 三维超声成像方法的研究[J]. 中国医疗器械信息,2000(3):29-31.

[5] 周黎明,王法刚. 超声波层析成像技术在三峡工程混凝土质量检测中的应用[J]. 无损检测,2004,26(10):517-519.

[6] 王五平,宋人心. 用超声波CT探测混凝土内部缺陷[J]. 水利水电工程学报,2003(2):56-60.

(上接第193页)

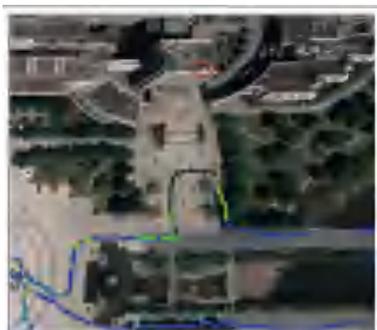


图2 实测平面图

Fig. 2 Field test plan

采用最小二乘法计算路径损耗指数。路径损耗指数由公式(6)给出:

$$n = \frac{m \sum_{i=1}^m \lg(d)_i PL_i - \sum_{i=1}^m \lg(d)_i \sum_{i=1}^m PL_i}{m \sum_{i=1}^m \lg(d)_i^2 - \left( \sum_{i=1}^m \lg(d)_i \right)^2} \quad (6)$$

利用 Matlab 工具 Curve fitting 对阴影衰落  $X_\sigma$  进行正态分布拟合,可以得到  $X_\sigma$  的标准差等参数,图3为阴影衰落的拟合曲线。由 Matlab 计算所得标准差  $\sigma$  为3.7,故  $X_\sigma$  为均值0,标准差为3.7的随机变量。

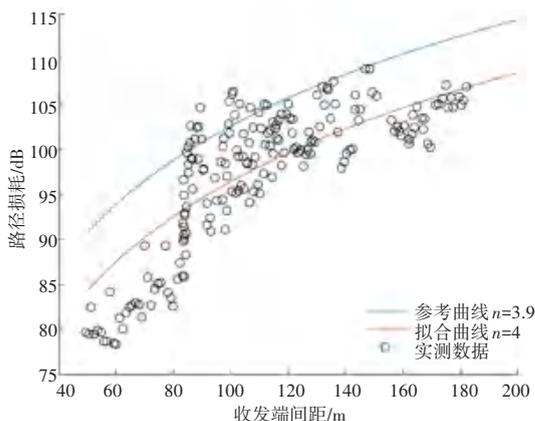


图3 路径损耗随距离变化

Fig. 3 Variation of pathloss with distance

由图3可知,由实测数据得出的拟合曲线与参考模型两者趋势变化相同,且无交叉重叠。相同收发端距离下,实测路径损耗小于 NLOS 参考模型的路径损耗。综合分析可知,本文中数据点的采集并非均在非视距环境下采集,整个场景较为空旷,地面环境较为复杂。参考曲线向下平移 8dB 将会与拟合曲线大致重合,因此,3GPP TR 38.901 中定义的室外 NLOS 环境下的路径损耗传播模型能够较好的反映当前条件下无线电波的传播特性。

## 4 结束语

5G 在未来的工业物联网中有着巨大的应用前景。本文对现有 5G 场景下的 3.5GHz 在室外传播的路径损耗开展实测,并与 3GPP 提出的路径损耗模型进行了比对,在原有理论模型的基础上得出了实用场景下最符合室外场景的路径损耗模型。本文结果可以为 5G 网络在室外场景下的快速部署提供一定程度的参考依据。

## 参考文献

[1] 周鑫. 室内无线信道测量及基于混响室的信道模拟研究[D]. 北京:北京交通大学,2018.

[2] 谢利娟. 基于测量的 15GHz 频段室内无线信道建模研究[D]. 南京:南京邮电大学,2016.

[3] 3GPP TR 38.901 V15.0.0 (2018-06) 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on Channel Model for Frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 15)

[4] 杨学志. 通信之道[M]. 北京:电子工业出版社,2016.

[5] 蒋学勤. 移动通信电波路径损耗的测试[J]. 贵州大学学报:自然科学版,2005,22(1):96-99.

[6] 陈杨,杨芙蓉,余扬尧. 5G 覆盖能力研究[J]. 通信技术,2018,51(12):2866-2873.

[7] Theodore S. Rappaport, Yunchou Xing, George R. MacCartney, Jr., Andreas F. Molisch, Evangelos Mellios, Jianhua Zhang. IEEE Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks—With a Focus on Propagation Models[J] IEEE Trans. Antenna and Propagation, 65(12), 2017.