

# 室内单载波太赫兹无线信号传播及覆盖性能分析

彭木根, 杨闯, 周天航

(北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)

**摘 要:** 针对太赫兹无线信号与传统频谱的差异性制约其应用于室内通信场景的问题, 提出了一种室内太赫兹无线信号传播的修正模型, 并分析了宽带单载波太赫兹无线信号传播及覆盖性能。具体地, 考虑障碍物厚度导致的吸收损耗问题, 建立了宽带太赫兹信道传递函数模型。基于射线追踪技术, 阐明了障碍物厚度、信号带宽对上述性能的影响。研究表明, 非视距障碍物反射可增强覆盖。此外, 太赫兹通信存在覆盖范围与容量性能间的均衡问题, 且理论频谱效率随太赫兹载频升高而下降。

**关键词:** 太赫兹; 传播; 带宽; 单载波; 覆盖

**中图分类号:** TN92

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2022014

## Analysis of propagation and coverage performance of indoor single-carrier radio signals in the terahertz bands

PENG Mugen, YANG Chuang, ZHOU Tianhang

State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Post and Telecommunications, Beijing 100876, China

**Abstract:** To tackle the problem that radio signal in the terahertz band had different features compared to that in the conventional spectrum, which restricted its application to indoor communication scenarios, a modified propagation model of terahertz radio signal was proposed. Based on the model, the propagation and coverage performances of wide-band single-carrier terahertz radio signal were analyzed. In particular, the wide-band terahertz channel transfer function was constructed, taking the absorption loss introduced by the thickness of the obstacles into account. Using the ray tracing technique, the impacts of the obstacles' thickness and the bandwidth on the propagation and coverage performances were examined, showing that the coverage performance can be improved by leveraging the reflections from the non-line-of-sight obstacles. Moreover, the trade-off between the coverage radius and the capacity of terahertz communications is revealed, and it is further found that the theoretical spectral efficiency decreases as the carrier frequency of terahertz radio signal increases.

**Keywords:** terahertz, propagation, bandwidth, single-carrier, coverage

## 0 引言

随着无线通信技术的发展, 日益增长的无线终端容量需求与有限频谱资源之间的矛盾愈发严重, 业内掀起了新频谱通信的研究热潮。太赫兹 (0.1~

10 THz) 以频谱资源丰富、大带宽特性, 成为 6G 的候选频谱之一<sup>[1]</sup>。为促进太赫兹通信的发展, 美国联邦通信委员会 (FCC, Federal Communication Commission) 于 2019 年开放了 95 GHz~3 THz 频段用于实验研究。同年, 世界无线电通信大会 (WRC,

收稿日期: 2021-09-29; 修回日期: 2021-12-01

通信作者: 杨闯, chuanyang@bupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61925101, No.62101059); 河北省重点研发计划基金资助项目 (No.21310201D)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61925101, No.62101059), The Natural Key Research and Development Program of Hebei Province (No.21310201D)

World Radio Communication Conferences) 在 275 ~ 450 GHz 频段内批准了 137 GHz 的带宽资源用于陆地移动通信和固定业务应用<sup>[2]</sup>。在需求牵引与政策支持下，太赫兹通信成为近年的研究热点。

相比传统 6 GHz 以下的无线通信信号，太赫兹无线信号遇到建筑障碍物、降雨等会产生极高的传播损耗，这使太赫兹无线通信更倾向应用于室内场景。据预测，6G 时代 80%~96% 的无线通信将发生在室内<sup>[3]</sup>，因此室内太赫兹无线信号传播特性成为太赫兹无线通信的研究重点<sup>[4]</sup>。

无线信号传播研究主要关注信道衰落特征和信号的覆盖性能<sup>[5]</sup>。相较于多载波，单载波传输具有稳定性高、功率需求低等特点，更适合信道特性尚不成熟的太赫兹频段。目前，单载波通信已用于 IEEE 802.15.3d<sup>[6]</sup>。

为探究室内单载波无线信号时空传播特性，文献[7]使用基于矢量网络分析仪和频率扩展器的频域信道测量系统对室内不同距离进行太赫兹视距 (LoS, line of sight) 信号测量，频率覆盖 140~220 GHz，结果表明视距信号传播损耗与对数路径损耗模型相吻合。然而，仅依靠 LoS 信号测量无法全面表征太赫兹传播特性。因此，文献[8]围绕视距和非视距 (NLoS, non line of sight)，基于 130~143 GHz 宽带测量平台产生连续扫频的单载波信号，对会议室场景进行信道测量，并利用射线追踪对测量多径结果进行分簇，分析了均方根时延扩展、角度时延扩展等信道特性，结果表明多径反射为室内太赫兹信号传播提供不可忽略的增益。文献[9]通过单载波伪随机序列对 310 GHz 大尺度和小尺度衰落特性进行了联合研究，发现莱斯 K 因子和均方根时延扩展强相关，但其研究没有考虑电磁极化问题。文献[10]针对不同极化方式下的太赫兹传播特性进行了分析，发现垂直极化波路径损耗小于水平极化。

基于传播特性研究，需要阐明太赫兹通信的覆盖性能。文献[11]通过射线追踪研究了太赫兹室内传播和覆盖性能，但局限于单频点。文献[12]研究了 1~2 THz 的覆盖性能，探索了视距阻塞、定向天线、分子吸收约束，以及不同距离、纬度、节点密度等因素的影响，由于未考虑环境电磁特性与多径信道时频相关性，不适用于室内场景。文献[13]研究了室内场景太赫兹覆盖性能，分析了室内移动、墙体阻碍、太赫兹窄波束天线、用户关联方案等因素的影响。文献[14]推导出聚集干涉的矩源函

数和平均干涉功率的表达式，为太赫兹室内覆盖研究提供了理论依据。然而，上述覆盖分析均未考虑环境中障碍物厚度影响。但障碍物厚度大于太赫兹传播信号波长数倍以上，它对覆盖性能的影响不可忽略。此外，针对宽带单载波，文献[6]基于当前标准化方案，仿真了太赫兹通信在不同信道带宽下的覆盖性能，并指出太赫兹赋能高速率数据通信的同时存在带宽约束下的传输距离受限问题，但上述结论还需在室内环境下进一步研究。总之，针对太赫兹无线信号对障碍物厚度敏感度高和室内高频单载波大带宽信号的传输及覆盖性能亟须阐明等问题<sup>[15]</sup>，本文的创新与贡献主要如下。

1) 考虑室内障碍物厚度因素，构建修正的太赫兹无线信号传播模型，搭建相应的射线追踪平台，并基于实测数据进行测量与仿真验证。

2) 基于上述修正的太赫兹无线传播模型，提出室内宽带太赫兹通信传播及覆盖仿真分析方法，针对宽带单载波进行性能仿真，阐明了太赫兹频段室内衰落频率的相关性。

3) 仿真验证了所提的修正模型及带宽选择方法。研究均方根时延、信道稀疏性、接收信噪比和信道容量等信号传播特性，并对不同带宽下的覆盖容量性能进行了研究，给出了不同带宽下的覆盖率和容量性能，阐明了频谱效率和载频关系。

## 1 模型与方法

室内障碍物反射可为太赫兹通信提供增益<sup>[8]</sup>。反射系数成为影响太赫兹无线信号室内传播的重要因素。为此，本文首先通过引入障碍物厚度，修正传统反射系数模型；然后在修正模型基础上，推导出宽带室内信道传递函数，支撑分析太赫兹单载波室内传播和覆盖性能。

### 1.1 室内反射系数修正模型

不失一般性，本文仅考虑电磁波的横电波 (TE, transverse electric) 部分，横磁波 (TM, transverse magnetic) 部分可通过类似方式进行扩展。根据菲涅尔公式和介质穿透衰减模型，考虑障碍物厚度的信号反射系数可以推导为

$$R_{\text{TE}}(f) = \frac{R'_{\text{TE}}(1 - \exp(-j2q))}{1 - R'^2_{\text{TE}} \exp(-j2q)} \quad (1)$$

其中， $q$  为材料厚度相关函数， $R'_{\text{TE}}$  为 TE 波菲涅尔反射系数，解析式分别为

$$q = \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\eta(f) - \sin^2(\theta)} \quad (2)$$

$$R'_{TE} = \frac{\cos(\theta) - \sqrt{\eta - \sin^2(\theta)}}{\cos(\theta) + \sqrt{\eta - \sin^2(\theta)}} \quad (3)$$

其中,  $d$  为障碍物厚度;  $\lambda$  为波长;  $\theta$  为入射波角度;  $\eta(f)$  为随频率变化的材料相对复介电常数, 表示为

$$\eta(f) = \eta'(f) - j\eta''(f) = \eta'(f) - j\frac{\sigma(f)}{\varepsilon_0\omega} \quad (4)$$

其中,  $\eta'(f)$  为材料相对介电常数,  $\sigma(f)$  为电导率,  $\varepsilon_0$  为真空介电常数,  $\omega = 2\pi f$  为角频率。

### 1.2 室内传播及覆盖建模

基于几何光学的射线追踪对太赫兹确定性信道模型进行精准预测, 已成为研究太赫兹传播及覆盖性能的重点技术。本文将修正的反射系数导入射线追踪模型, 分析太赫兹室内传播及覆盖特性。

此外, 由于传统射线追踪只确定一个离散频率作为信道传输条件, 不支持大带宽太赫兹通信。文献[15]提出宽带射线追踪技术, 将频率范围划分为若干个子频带以保证每个窄带信号经历平坦衰落。本文基于宽带射线追踪原理和修正反射系数构建信道模型, 第  $i$  条射线信道传递函数表示为

$$H_i(f) = \sum_{k=1}^{N_f} E_i(f_k) \delta(f - f_k) \quad (5)$$

其中,  $N_f$  表示频率采样点数,  $E(f)$  表示信号强度,  $\delta$  表示单位脉冲函数,  $i$  为正整数。

室内多障碍下传输信道存在多径, 包括视距和非视距。本文假设共存在  $N_{\text{Rays}}$  条路径, 则多径信道传递函数为

$$H(f) = \sum_{i=1}^{N_{\text{Rays}}} H_i(f) g(f, \phi_i, \varphi_i) \quad (6)$$

其中,  $g(f, \phi_i, \varphi_i)$  表示天线增益,  $\phi_i$  与  $\varphi_i$  分别表示第  $i$  条射线的天线方位角与仰角。对于 LoS 信号, 信道传递函数为

$$H_{\text{LoS}}(f) = \frac{c}{4\pi f r_{\text{LoS}}} e^{-j2\pi f \tau_{\text{LoS}} - \frac{1}{2}k(f)r_{\text{LoS}}} \quad (7)$$

其中,  $r_{\text{LoS}}$  为视距传播距离,  $\tau_{\text{LoS}} = r_{\text{LoS}}/c$  为信号到达时间,  $c$  为光速。

除视距和反射路径外, 还可根据基尔霍夫理论

计算漫反射情况。但文献[16]测量结果表明, 太赫兹漫反射射线能量较低, 无法被有效探测。此外, 太赫兹频段衍射效应不明显, 计算复杂度高。因此, 漫反射和太赫兹衍射在本文中忽略不计。

综上所述, 信道传递函数表示为

$$H(f) = \frac{c}{4\pi f r_{\text{LoS}}} e^{-j2\pi f \tau_{\text{LoS}} - \frac{1}{2}k(f)r_{\text{LoS}}} T_{\text{LoS}}(f) \Xi_{\text{Tran}}^{\text{LoS}} \cdot g(f, \phi_{\text{LoS}}, \varphi_{\text{LoS}}) + \sum_{i=1}^{N_{\text{Re}}} \left( \frac{c}{4\pi f r_{\text{Re}}^{(i)}} \right) e^{-j2\pi f \tau_{\text{Re}}^{(i)} - \frac{1}{2}k(f)r_{\text{Re}}^{(i)}} R_{\text{Re}}^{(i)}(f) T_{\text{Re}}^{(i)}(f) \Xi_{\text{Tran}}^{(i)} g(f, \phi_i, \varphi_i) \quad (8)$$

其中,  $\Xi_{\text{Tran}}^{(i)}$  表示第  $i$  条射线是否存在材料透射阻碍, 若存在, 则取值为 1; 否则取值为  $1/T^{(i)}(f)$ 。

本文将基于修正的信道传递函数模型计算室内接收信号信噪比 (SNR, signal noise rate), 进而分析室内太赫兹覆盖与容量性能。覆盖率定义为接收信噪比大于某一门限  $T$  的概率。根据香农定理, 单位区域面积内的平均接收信号容量定义为

$$R = P_{\text{BW}}(\text{SNR} > T) \frac{\sum_{k=1}^N B \log(1 + \text{SNR}_k)}{N} \quad (9)$$

其中,  $N$  表示接收点个数,  $\text{SNR}_k$  表示第  $k$  个接收点对应的接收信噪比,  $P_{\text{BW}}(\text{SNR} > T)$  表示通信区域覆盖率。

## 2 实验验证与分析

为证明修正反射系数的必要性, 本文基于超外差太赫兹测量平台进行反射系数测量。测量系统参数如表 1 所示。信号上变频至 99 GHz 射频, 并实测不同厚度介质下反射系数。太赫兹反射系数建模与测量结果对比如图 1 所示。结果表明, 实测结果与修正后理论模型趋势一致。

表 1 测量系统参数

参数	数值
载波频率/GHz	99
入射角度	45°
介质厚度/cm	{0.2, 0.3, 0.4, 0.5}

## 3 仿真验证与分析

为分析室内太赫兹信号传播及覆盖特性, 本文建立 2 种经典室内通信场景, 并基于修正模型进行了射线追踪仿真分析。

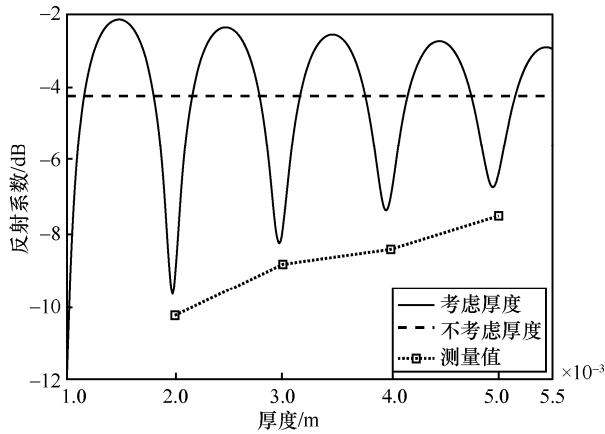


图 1 太赫兹反射系数建模与测量结果对比

### 3.1 仿真场景设置

基于宽带射线追踪和修正模型,本文首先建立三维室内太赫兹无线通信系统,每条传输射线对应一组信道状态信息(CSI, channel state information)<sup>[17]</sup>。由于太赫兹自由空间损耗严重,300 GHz 频段下米级光程差将产生大于 40 dB 功率损耗。因此超过两次的反射路径忽略不计。发射端采用窄波束定向喇叭天线进行数据传输;为观察网络覆盖性能,接收端采用全向天线。

参考文献[8],室内太赫兹信道测量的发射功率为 1 mW,本文模型 RF 发射功率设置为 0 (1 mW)。在仿真频段选择方面,基于大气衰减选择 F 频段(90~140 GHz)与 G 频段(140~220 GHz)传输窗口<sup>[1]</sup>。该窗口是目前的主要测量频段<sup>[7-8]</sup>。此外,单载波太赫兹标准化协议提供最高 69 GHz 带宽<sup>[6]</sup>,考虑喇叭天线波导扫频限制,本文系统带宽范围取 1~50 GHz。依托实际测量方案,100 GHz 天线增益为 15.5 dBi,半功率波束宽度为 30°<sup>[8]</sup>;200 GHz 天线增益为 21 dBi,半功率波束宽度为 13°<sup>[7]</sup>。系统覆盖信噪比门限为-5 dB<sup>[14]</sup>。系统参数如表 2 所示。

基于系统参数假设,本文模拟了会议室、办公室 2 种典型室内场景,具体描述如下。

1) 会议室场景模型如图 2 所示。建模为 5 m×4 m×3 m 大小的封闭室内空间,墙体、天花板和地板厚度约为 0.2 m。室内空间放置长 2 m、宽 1.5 m、高 0.6 m 的矩形会议桌,围绕会议桌放置若干座椅。此外,会客茶几、临时储物柜等要素被考虑在内。上述物体将产生丰富的多径反射辅助太赫兹无线覆盖。发射端(Tx)放置在(4,1.2)坐标处,高度为 1.4 m,定向天线指向方向为 x 轴负方向。为观察室内覆盖情况,接收端(Rx)均匀放置在高度 0.7 m 处。设置典型接收节点(1.5,1.2,0.7)以分析会议室场景多径信道传播特性。

参数	数值
发射功率/dBm	0
带宽范围/GHz	1 ~ 50
起始频率/GHz	{90,170}
截止频率/GHz	{140,220}
发射天线增益(100 GHz)/dBi	15.5
半功率波束宽度(100 GHz)	30°
发射天线增益(200 GHz)/dBi	21
半功率波束宽度(200 GHz)	13°
本底噪声/(dBm·Hz <sup>-1</sup> )	-174
信噪比门限/dB	-5
频域采样率/GHz	512

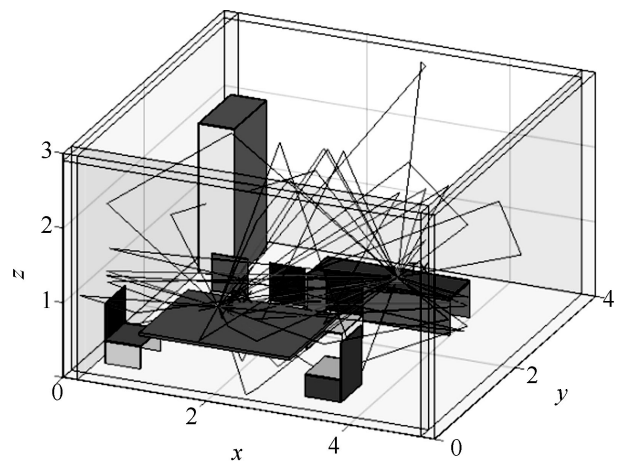


图 2 会议室场景模型

2) 办公室场景模型如图 3 所示。建模为 10 m×6 m×3 m 大小的封闭室内空间,墙体、天花板和地板厚度约为 0.2 m。室内放置 6 个办公工位,包括桌椅、格挡等要素。与会议室场景相类似,发射端(Tx)放置在(8,2)坐标处,高度为 1.4 m,定向天线指向方向为 x 轴负方向。接收端(Rx)均匀放置在高度 0.7 m 处。设置典型接收节点(4,2,0.7)以分析办公室场景多径信道传播特性。

### 3.2 传播特性分析

对于太赫兹宽带通信系统,信号时空传播特性至关重要,包括视距路径损耗、多径反射、均方根时延、角度扩展等<sup>[18]</sup>。功率时延角度谱(PDAP, power delay angular profile)记录不同到达角和时延内接收端多径信号的功率强度,包括 LoS 和多径分量。各谱线代表可分辨的真实空间传播路径,功率时延角度谱定义为

$$P(\tau, \theta) = |h(\tau, \theta)|^2 \quad (10)$$

其中,  $\tau$  为时延,  $\theta$  为到达角,  $h(\tau, \theta)$  为信道冲击响应。

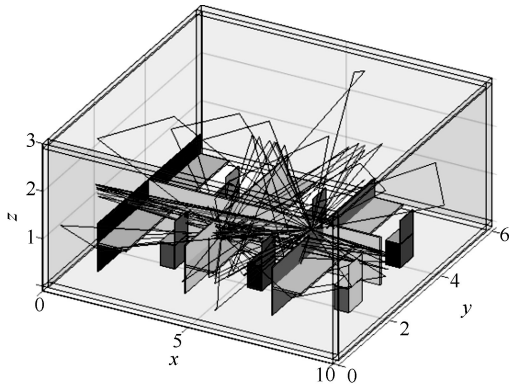
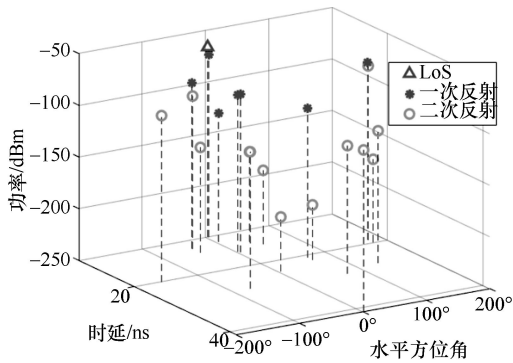
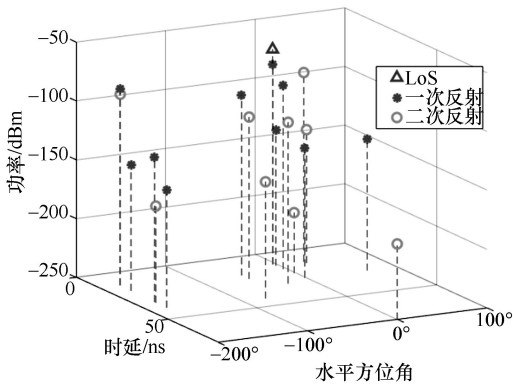


图 3 办公室场景模型

如图 4 所示, 本文分析了 F 频段载波、10 GHz 带宽下 2 种室内场景主要多径射线的功率时延角度谱。Tx 到 Rx 的全部多径轨迹在图 2 和图 3 中给出, 接收功率低于自然底噪的路径忽略不计。



(a) 会议室场景



(b) 办公室场景

图 4 室内场景典型 Rx 功率时延角度谱

从图 4 可以看出, 太赫兹频段路径损耗严重, 信道呈稀疏性。由于 Rx 处于 Tx 定向天线主瓣范围

内, 视距信号时延最低、接收功率增益最大, 会议室和办公室场景分别为 -66 dBm 和 -67 dBm。相比视距信号, 会议室场景下, 两组接收功率最强的一次反射信号衰减不超过 7 dB 和 10 dB。办公室场景桌椅等阻碍因素较多, 平均穿透损耗大, 反射路径增益低于会议室场景, 最强一次反射接收功率较视距路径损耗超过 12 dB。

不同室内场景反射射线接收功率的累积密度函数 (CDF, cumulative density function) 如图 5 所示。会议室场景一次反射信号功率相比办公室场景增益高 10~20 dB; 而两类场景下二次反射信号功率基本相同。同一场景下, 曲线趋势一致, 且随反射次数增加, 信号接收功率降低。相比一次反射, 二次反射损耗超过 25~50 dB。这是太赫兹信号高反射以及高自由空间传播衰减造成的。

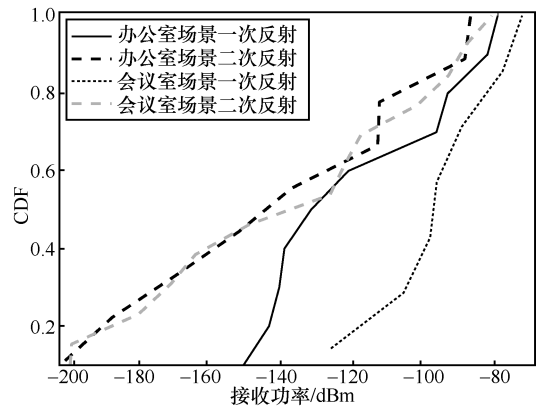


图 5 不同室内场景反射射线接收功率的累积密度函数

由于信号相位会因光程差不同产生相位偏移, 最终导致和传统接收频谱的差异。为阐明单载波大带宽传播特性, 图 6 展示了 50 GHz 宽带信号在两类传输频段下的接收端频谱情况, 特别地, 与已有未考虑障碍物厚度的太赫兹信道模型<sup>[19]</sup>进行反射路径对比。

首先, 理想无厚度障碍模型由于忽略了不同厚度下, 复介电常数造成的障碍物吸收损耗, 反射、透射信号功率被大量保留, 多径信号功率明显高于修正模型方案。甚至在多径信号叠加下, 出现部分频点 NLoS 信号能量超过视距信号的情况, 与太赫兹信道稀疏性相矛盾。而修正后的反射模型与 PDAP 谱信号功率吻合。

对于考虑障碍厚度的修正模型。首先, 2 种场景下的视距信号频谱衰减趋势一致, 幅度差异主要由空间传播距离和载波频段差异造成。此外, 视距

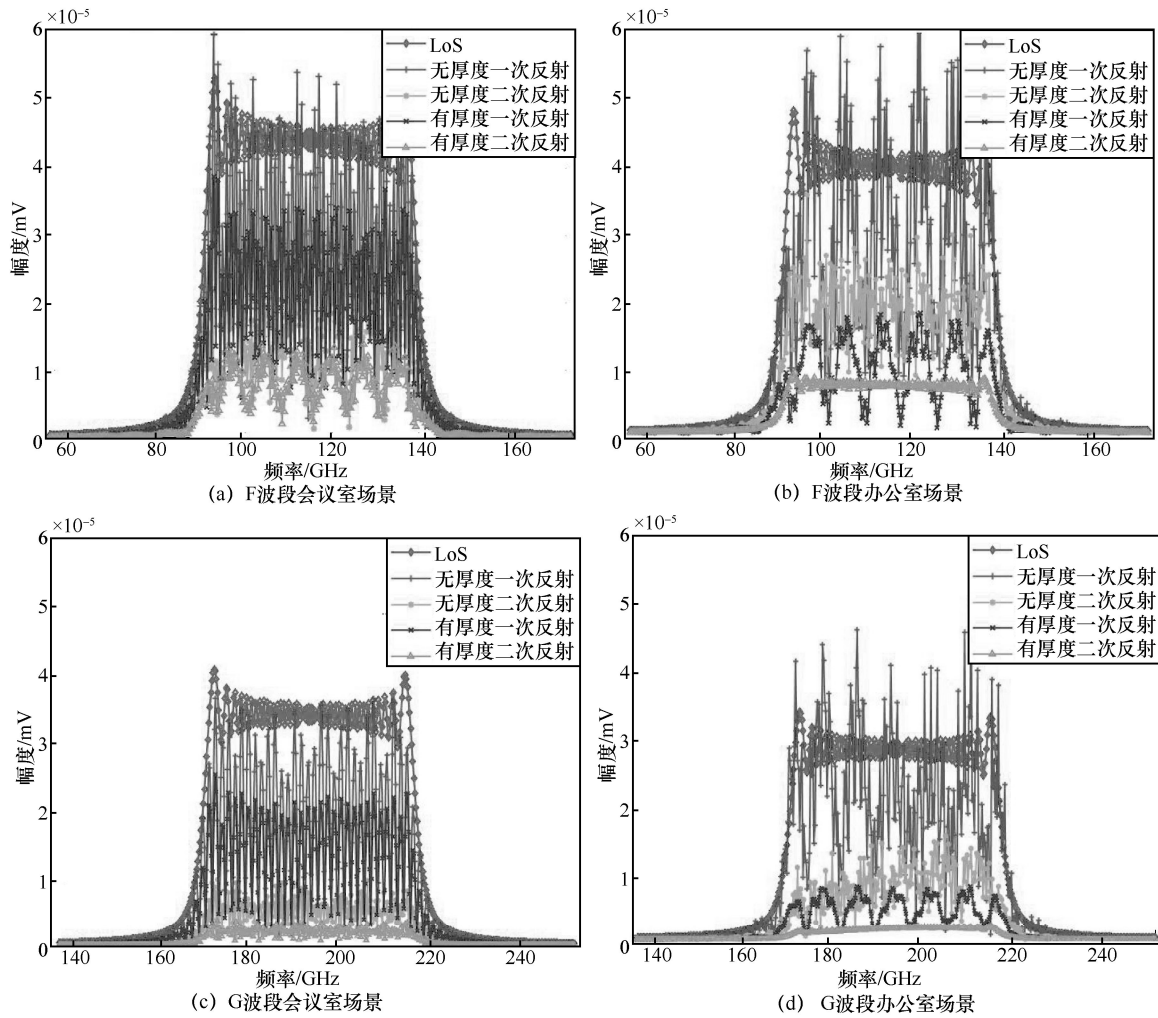


图 6 50 GHz 宽带信号在两类传输频段下的接收端频谱

路径在太赫兹大带宽系统中存在频率相关性。F 频段参数下，90 GHz 频点与 140 GHz 频点信号强度差约 0.6 dB；G 频段参数下，170 GHz 频点与 220 GHz 频点信号强度差约 0.5 dB。同一带宽下的差异性衰落将造成信号波形畸变，因此，为补偿太赫兹衰落频率相关性差异，需依托宽带 LoS 进行精准测量、模型建立与信道估计。其次，NLoS 信号功率不容忽视。F 频段参数下会议室场景一次和二次反射信号强度约为视距信号的 1/2 和 1/5；G 频段由于载波频率更高，反射造成的额外路径损耗加剧，一次和二次反射信号强度为视距信号的 1/3 和 1/6。这说明太赫兹反射信号具有一定的增强覆盖能力，但随载波频段频率增加，视距信号主导作用愈发显著。此外，相比视距路径信号，反射信号功率随频率变化情况不明显，信号能量在选定带宽范围内近似均匀分布。这是由于多路反射路径产生多径光程差与相位偏移，不同相位信号叠加造成的。

### 3.3 覆盖性能及容量分析

除传播特性外，覆盖与容量是衡量通信性能的主要参数。本文首先分析典型节点通信性能。F 频段 2 种场景下典型节点接收信噪比、容量随带宽变化如图 7 所示。

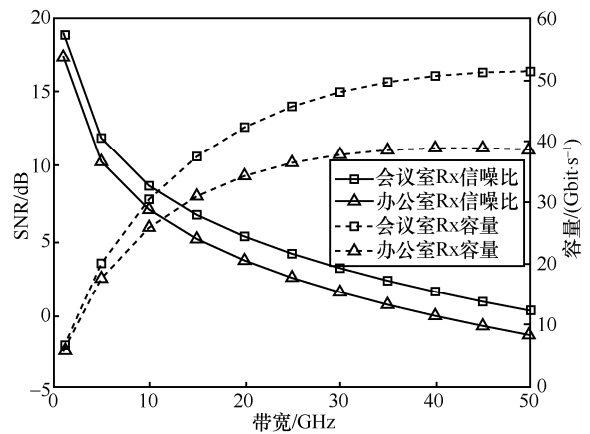


图 7 接收信噪比、容量随带宽变化

信噪比方面，相同发射信号功率下，太赫兹大带宽引入更多系统噪声，导致接收信噪比随系统带宽增加逐渐下降。此外，由于环境空间狭小，会议室场景相较办公室场景具有更低的自由空间损耗和更高的天线增益，接收信噪比高约 1.7 dB。

容量方面，受益于单载波大带宽优势，接收信号容量随系统带宽增加而增大。带宽参数影响下，10 GHz 带宽支持超过 25 Gbit/s 的容量需求；环境参数影响下，因电磁特性造成的信噪比差异，40 GHz 带宽下办公室场景接收容量较会议室低约 30%。本文基于上述分析发现，随着系统带宽增加，容量增长效果受宽带噪声制约而降低，曲线斜率下降，逐渐趋于平缓。为进一步释放大带宽优势，需降低接收端解调所需信噪比，说明宽带约束下的太赫兹通信系统通过牺牲通信质量换取大带宽传输速率。

本文进一步将典型接收节点推广到全局覆盖范围。与低频覆盖相比，太赫兹受高频路径损耗、反射损耗、电磁极化、窄波束定向天线等因素影响，覆盖性能受到障碍物厚度、波束宽度和系统带宽约束。在 F 频段喇叭天线定向覆盖作用下，不同带宽

的接收信噪比分布如图 8 和图 9 所示。

带宽为 1 GHz 时，会议室、办公室场景最大接收信噪比为 19.8 dB 和 18.2 dB；反射信号作用下，2 种场景平均接收信噪比分别提升 0.6 dB 和 0.3 dB。上述差异的原因在于办公室场景遮挡严重，信号覆盖集中在特定办公区域。带宽为 50 GHz 时，依然保持对热点区域的覆盖效果，但总体接收信噪比下降严重。会议室、办公室场景相比带宽为 1 GHz 时，平均信噪比分别下降 19 dB 和 18.9 dB，与典型节点接收情况保持一致。2 种带宽参数设置下，视距信号能量占总功率 90%以上，进一步验证了太赫兹信道稀疏性。

根据接收信噪比，进一步计算覆盖和系统平均信号容量。不同频段下，室内场景覆盖与平均容量如图 10 所示。分析可知，太赫兹通信系统存在覆盖与容量性能间的带宽均衡，且与频段选择和场景限制密切相关。

覆盖方面。首先，由于大带宽限制接收信噪比，太赫兹室内信号覆盖率随系统带宽增加而降低。对于 F 频段，会议室场景下带宽高于 25 GHz 时覆盖率低于 35%；办公室场景由于空间范围更大、障

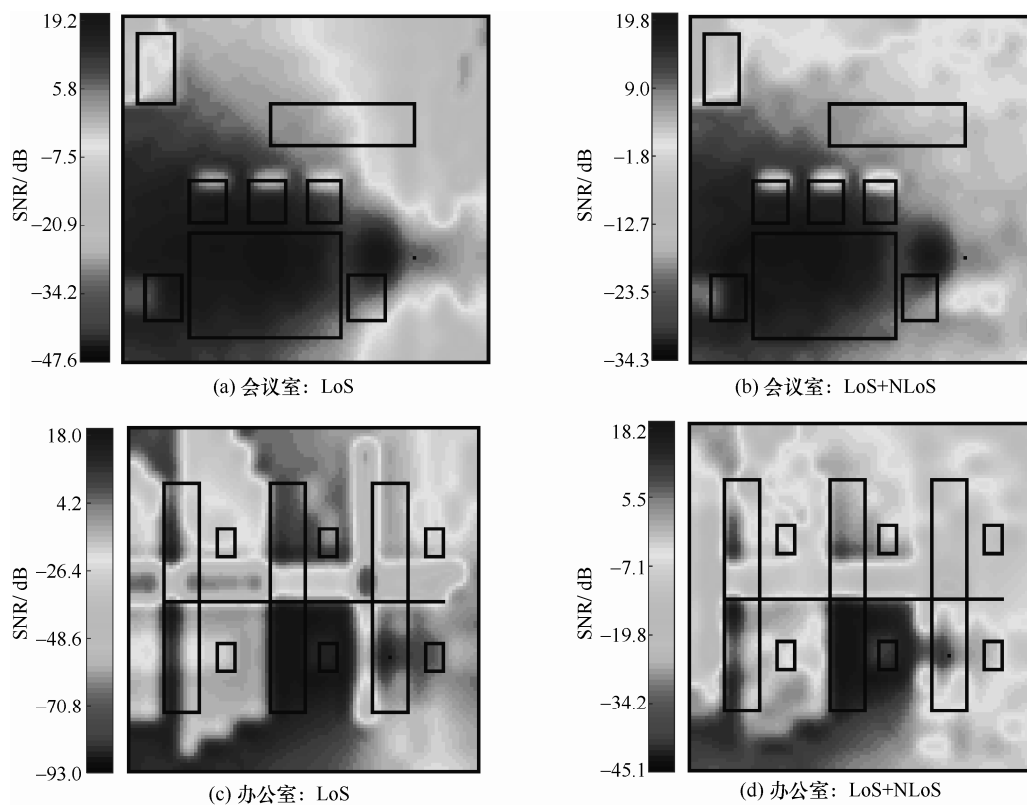


图 8 带宽为 1 GHz 时接收信噪比分布

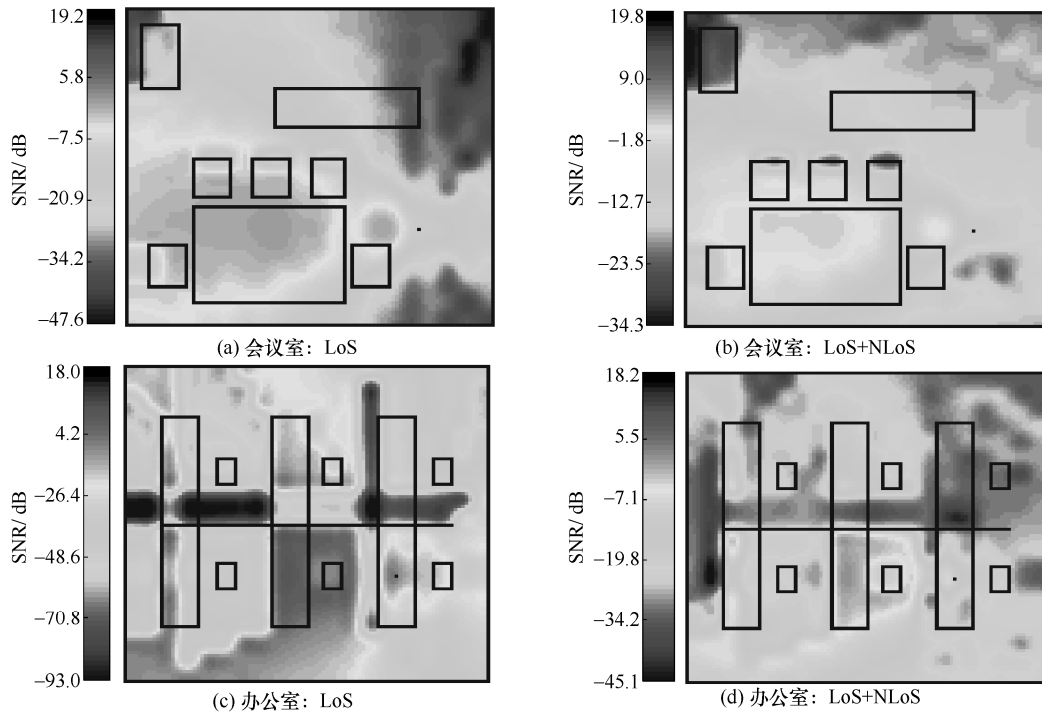


图 9 带宽为 50 GHz 时接收信噪比分布

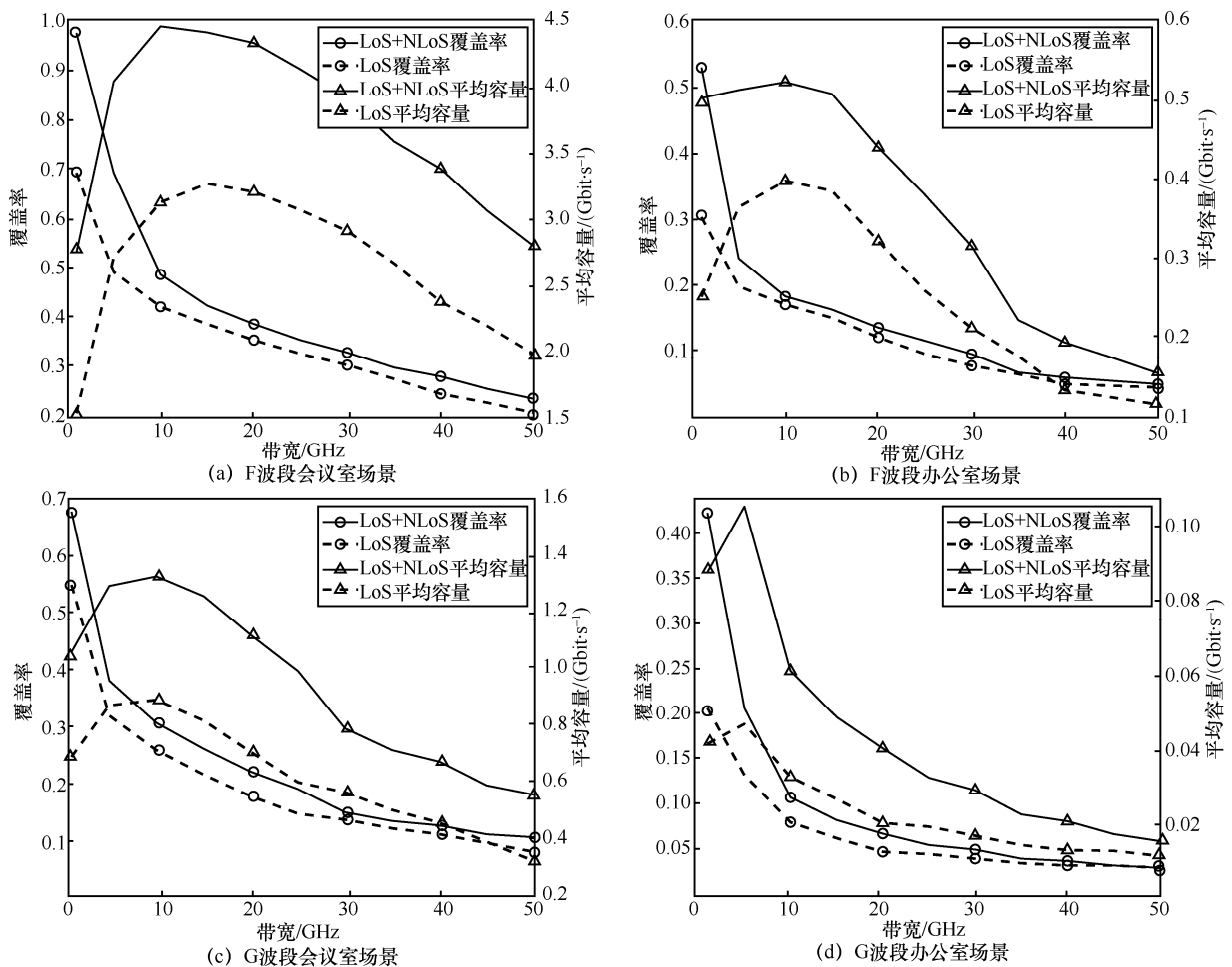


图 10 室内场景覆盖率与平均容量

碍物视距阻塞严重, 25 GHz 带宽下覆盖率相比会议室场景低 24%。对于 G 频段, 由于半功率波束宽度相较 F 频段下降 3 dB, 且传播信号经历更加严峻的自由空间衰落, 2 种室内场景下的覆盖率相较 F 频段均降低 30%。其次, 和前文分析一致, 太赫兹非视距信号具有增强覆盖能力, 且在低载波、小带宽情况下覆盖提升效果更为显著。对于 F 频段, 1 GHz 带宽下, 针对会议室、办公室场景, 非视距信号可将覆盖率提升 28%和 22.5%; 然而在大带宽情况下, 非视距信号对场景覆盖提升能力下降, 特别对于 G 频段的办公室场景, 超过 40 GHz 带宽时非视距信号无法提升覆盖率。原因在于随带宽增加, 信道稀疏性增强, 覆盖性能逐渐由视距信号占主导。

系统容量方面。首先, 在速率增益和覆盖受限的共同影响下, 容量随带宽增加, 呈先增后减趋势。F 频段下, 会议室、办公室场景平均容量随带宽增加均出现最高极值, 平均容量拐点在 12 GHz 带宽附近。其中会议室场景容量最高可实现每平方米 4.49 Gbit/s; G 频段下, 受高频自由空间损耗和窄波束影响, 会议室、办公室场景最大平均容量降至 1.3 Gbit/s 和 0.12 Gbit/s。特别在办公室场景下, 由于覆盖受限, 系统容量极值下降至 5 GHz 带宽附近。造成上述趋势的原因是低带宽情况下, 系统平均容量由带宽主导, 因带宽增加而提升; 随着带宽进一步增大, 覆盖率缩小, 导致平均容量下降。其次, 频谱效率随太赫兹载频升高而下降。载频由 F 频段上升至 G 频段, 5 GHz 带宽下, 办公室、会议室理论谱效分别下降 68.6%和 78.8%。

综上所述, 太赫兹通信系统带宽不宜随意设定, 需根据具体通信场景和频段选择合适的带宽范围实现覆盖率和容量的折中。为进一步发挥太赫兹大带宽优势, 保证多用户接入覆盖情况下扩大可用带宽范围, 需从传输技术角度出发实现瓶颈突破, 如混合波束调制<sup>[20]</sup>、基于距离的自适应资源分配<sup>[21]</sup>等。

#### 4 结束语

本文针对室内多障碍场景, 提出一种考虑障碍物厚度的太赫兹信号传播修正模型, 并基于宽带射线追踪技术, 针对室内单载波宽带太赫兹信号传播和覆盖性能进行分析。模型测量结果表明, 太赫兹频段下, 障碍物厚度造成反射和透射吸收损耗, 进而影响信号传播特性。双频段、多带宽仿真表

明, 首先, 非视距反射可增强覆盖率, 但覆盖与容量性能间存在带宽均衡问题; 其次, 太赫兹理论频谱效率随载波升高而下降。本文研究具有普适性, 可推广至其他频段和可精确描述障碍物尺寸及电磁特性的场景, 用于评估太赫兹通信带宽并辅助节点部署。

#### 参考文献:

- [1] 谢莎, 李浩然, 李玲香, 等. 太赫兹通信技术综述[J]. 通信学报, 2020, 41(5): 168-186.  
XIE S, LI H R, LI L X, et al. Survey of terahertz communication technology[J]. Journal on Communications, 2020, 41(5): 168-186.
- [2] MARCUS M J. ITU WRC-19 spectrum policy results[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(6): 4-5.
- [3] CISCO. Cisco vision: 5G-thriving indoors[R]. Cisco White Paper, 2017.
- [4] 周天航, 杨闯, 刘子乐, 等. 太赫兹无线组网: 原理、现状与挑战[J]. 电信科学, 2021, 37(6): 33-44.  
ZHOU T H, YANG C, LIU Z L, et al. Terahertz wireless networking: principles, status and challenges[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(6): 33-44.
- [5] 张洪铭, 闫实, 唐斌, 等. 海上无线通信技术: 现状与挑战[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(4): 392-401.  
ZHANG H M, YAN S, TANG B, et al. Maritime communications technologies: current progress and challenges[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(4): 392-401.
- [6] PETROV V, KURNER T, HOSAKO I. IEEE 802.15.3d: first standardization efforts for sub-terahertz band communications toward 6G[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(11): 28-33.
- [7] ABBASI N A, HARIHARAN A, NAIR A M, et al. Channel measurements and path loss modeling for indoor THz communication[C]// Proceedings of 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [8] YU Z M, CHEN Y, WANG G J, et al. Wideband channel measurements and temporal-spatial analysis for terahertz indoor communications[C]// Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC workshop). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [9] 田浩宇, 唐盼, 田磊, 等. 基于信道测量的短距离太赫兹信道特性分析[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(6): 59-65.  
TIAN H Y, TANG P, TIAN L, et al. Analysis of short-distance terahertz channel characteristics based on channel measurements[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020, 43(6): 59-65.
- [10] 武晓磊, 赵忠鑫, 韩九州, 等. 频率与极化方式对室内太赫兹信道参数的影响[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 24-30.  
WU X L, ZHAO Z X, HAN J Z, et al. Influence of frequency and polarization mode on indoor terahertz channel parameters[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2021, 42(3): 24-30.
- [11] GOUGEON G, CORRE Y, ASLAM M Z. Sub-THz channel characterization from ray-based deterministic simulations[J]. ITU Journal: ICT Discoveries, 2019, 2(1): 17-25.

- [12] CHEN W R, LI L X, CHEN Z, et al. Coverage modeling and analysis for outdoor THz networks with blockage and molecular absorption[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(5): 1028-1031.
- [13] WU Y Z, HAN C. Interference and coverage analysis for indoor terahertz wireless local area networks[C]//Proceedings of 2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [14] WU Y Z, KOKKONIEMI J, HAN C, et al. Interference and coverage analysis for terahertz networks with indoor blockage effects and line-of-sight access point association[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(3): 1472-1486.
- [15] PRIEBE S, JACOB M, KÜRNER T. Calibrated broadband ray tracing for the simulation of wave propagation in mm and sub-mm wave indoor communication channels[C]//Proceedings of European Wireless 2012; 18th European Wireless Conference 2012. Poznan: VDE, 2012: 1-10.
- [16] PRIEBE S, KANNICHT M, JACOB M, et al. Ultra broadband indoor channel measurements and calibrated ray tracing propagation modeling at THz frequencies[J]. Journal of Communications and Networks, 2013, 15(6): 547-558.
- [17] 尹博南, 彭木根, 刘晨熙. 无人机无线网络覆盖与切换性能分析[J]. 通信学报, 2020, 41(11): 22-29.  
YIN B N, PENG M G, LIU C X. Analysis of UAV wireless network coverage and handover performance[J]. Journal on Communications, 2020, 41(11): 22-29.
- [18] 李树, 赵雄文, 王琦, 等. 26 GHz 室外微蜂窝毫米波信道测量与建模研究[J]. 通信学报, 2017, 38(8): 131-139.  
LI S, ZHAO X W, WANG Q, et al. Research on 26 GHz mm-wave channel measurements and modeling for outdoor microcells[J]. Journal on Communications, 2017, 38(8): 131-139.
- [19] CHEN Y, LI Y B, HAN C, et al. Channel measurement and ray-tracing-statistical hybrid modeling for low-terahertz indoor communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(12): 8163-8176.
- [20] LIN C, LI G Y. Adaptive beamforming with resource allocation for distance-aware multi-user indoor terahertz communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(8): 2985-2995.
- [21] HAN C, BICEN A, AKYILDIZ I F. Multi-wideband waveform design for distance-adaptive wireless communications in the terahertz band[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(4): 910-922.

## [作者简介]



彭木根（1978- ），男，江西吉安人，博士，北京邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为 6G 无线组网、雾无线网络和智慧物联网等。



杨闯（1992- ），男，河北丰润人，北京邮电大学在站博士后，主要研究方向为太赫兹电磁参数测量、太赫兹信道建模、太赫兹通信探测一体化。



周天航（1998- ），男，河北遵化人，北京邮电大学硕士生，主要研究方向为太赫兹通信探测一体化。