

激光与光电子学进展

基于 Beckman-Kirchhoff 散射理论的太赫兹信道建模与容量分析

杨晋生, 宗磊*

天津大学微电子学院, 天津 030072

摘要 太赫兹(0.1~10 THz)通信技术以其超大带宽资源和超高通信速率等特点成为未来无线通信的关键技术。基于 Beckman-Kirchhoff 散射理论和射线追踪技术,在太赫兹波段对统一的多射线信道模型进行了修正,该模型结合了直射、反射和散射,并用已有的文献数据对模型进行了验证。此外,使用等功率分配和注水功率分配策略对太赫兹宽带信道容量进行表征。结果表明由于较高的频率选择性,资源分配在开发太赫兹频谱方面极为重要。该研究为太赫兹通信系统的研究与设计提供了参考依据。

关键词 大气光学与海洋光学; 太赫兹; Beckman-Kirchhoff 散射理论; 射线追踪; 多射线信道; 信道容量

中图分类号 TN 929.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2301001

Modeling and Capacity Analysis of Terahertz Channel Based on Beckman-Kirchhoff Scattering Theory

Yang Jinsheng, Zong Lei*

School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 030072, China

Abstract Terahertz (0.1-10 THz) band communication is envisioned as a key technology of future wireless communication because of its technical characteristics, such as super large bandwidth resources and super high communication rates. Herein, ray-tracing techniques and Beckman-Kirchhoff scattering theory are used to modify a unified multi-ray channel model in the terahertz band. The model combines direct, reflection, and scattering, and is supported by experimental data from the literatures. Furthermore, the wideband channel capacity usage is characterized using equal power and water-filling power allocation strategies. The simulation results show that the importance of resource allocation in exploiting the terahertz spectrum due to its extremely high frequency-selectivity. The study will provide some guidance for future research and design of the terahertz communication systems.

Key words atmospheric optics and ocean optics; terahertz; Beckman-Kirchhoff scattering theory; ray-tracing; multi-ray channel; channel capacity

1 引言

在过去 30 年中,数据速率每 18 个月翻一番,现有的无线通信系统已经接近其容量极限^[1-2]。太赫兹频段(0.1~10 THz)位置介于微波和红外区域之间,可以提供超大带宽和极高的数据传输^[3]。随着信息化建设的推进,太赫兹通信技术被认为是下一代无线通信系统最有前途的技术之一^[4],有望成为解决无线频谱稀缺和容量限制的关键。

为了在太赫兹频段实现高效的无线通信网络,需要开发准确的信道模型。射线追踪技术被广泛应用于无线信道建模。由于太赫兹波波长非常短,射线跟踪技术具有非常好的预测能力^[5]。文献[6-7]中,基于射线追踪建立了太赫兹信道模型,并对信道模型进行了简单分析。然而,由于太赫兹波段较短,反射和散射的分析更为复杂和困难^[8]。文献[9]给出了三维空间中接收信号功率谱密度的解析解,研究了三维无线信道的时空特性。但是,这些低频段的模型并没有捕捉到

收稿日期: 2021-09-15; 修回日期: 2021-11-01; 录用日期: 2021-11-12

基金项目: 北京市优秀人才资助计划青年拔尖项目(2016000026833ZK08)

通信作者: *15737344483@163.com

太赫兹波段的特性,例如很高的反射损耗^[10]。文献[11]提出了一种新的 300 GHz 随机室内信道模型。它结合时域和频域建模来解决超宽带太赫兹信道的频散问题。然而,该模型仅限于基于特定角度范围的镜面反射,对宽带信道特性没有深入的分析。在文献[12-13]中,有效粗糙度模型可以用于城市的无线电波传播预测,与传统的信道模型相比,预测精度显著提高。但是,该模型没有考虑材料表面起伏的相关长度和波的入射方向。文献[14]采用了基于低粗糙度 Beckmann-Kirchhoff 散射理论的信道模型,并用测量结果验证了模型的准确性。但是,存在散射和反射的重复计算,对于高粗糙度的情况也没有给出解决方案。

因此本文提出了一种基于射线追踪技术改进的太赫兹信道模型。根据 Beckman-Kirchhoff 散射理论,对现有的散射模型进行修正,并给出了高粗糙度情况下更精确的信道模型,并对该模型进行了验证。然后分别分析了注水功率(WF)分配方案和等功率(EP)分配方案的信道容量。采用 WF 分配算法进行功率分配相比于 EP 分配算法,信道容量得到显著提升^[15-16]。仿真结果表明,太赫兹波较高的频率选择性,使资源分配在开发太赫兹频谱方面变得极为重要。

2 太赫兹多射线信道模型

太赫兹波在传输过程中,会发生直射(line of sight, LoS)、反射、散射和绕射,最后以不同的路径到达接收端。太赫兹频率较高、波长较短、绕射能力较差、绕射路径通常忽略不计^[17],故其传播过程如图 1 所示。其中 d 为发射器和接收器之间的距离。对于反射, r_1 为发射器到反射点的距离, r_2 为反射点到接收器的距离。对于散射, s_1 为发射器到散射点的距离,而 s_2 为散射点到接收器的距离。

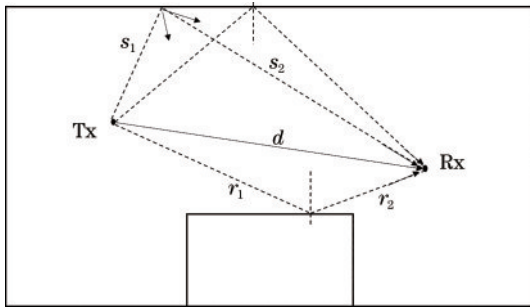


图 1 电磁波传播模型在发射机(Tx)和接收机(Rx)之间的直射射线传播、反射射线传播和散射射线传播

Fig. 1 Electromagnetic wave propagation model with LoS, reflected ray, and scattered ray between transmitter (Tx) and receiver (Rx)

LoS、反射(镜面)和扩散散射(非镜面)路径的多射线传输函数,即路径损耗可表示为

$$H_i(f) = H_{LoS}(f) + H_{Ref}(f) + H_{Sca}(f), \quad (1)$$

式中, $H_{LoS}(f)$ 、 $H_{Ref}(f)$ 和 $H_{Sca}(f)$ 分别为直射路径、反射路径和散射路径的信道传输函数。

2.1 视距传播模型

LoS是电磁波最简单的传播方式,视距传输函数由扩散损失函数和分子吸收函数两部分构成,即扩散损耗和分子吸收损耗。扩散损失函数为

$$H_{Spr}(f) = \frac{c}{4\pi f d}, \quad (2)$$

式中: c 为光速; f 为载波频率; d 为收发端的距离。

分子吸收函数可表示为

$$H_{Abs}(f) = \exp[-\frac{1}{2}k(f)d], \quad (3)$$

式中, $k(f)$ 为吸收损耗。常规介质中对太赫兹波段吸收的主要贡献来自水蒸气分子^[18]。

直射路径的传输函数可表示为

$$H_{LoS}(f) = H_{Spr}(f)H_{Abs}(f)\exp(-j2\pi f\tau_{LoS}), \quad (4)$$

式中, $\tau_{LoS} = \frac{d}{c}$ 为直射路径的时间。

2.2 反射传播模型

使用 Kirchhof 理论来捕获镜面反射中的反射损耗。假设 $R(f)$ 为反射系数, $H_{Ref}(f)$ 是反射射线的传输函数。则有

$$H_{Ref}(f) = \left(\frac{1}{4\pi f(r_1 + r_2)}\right) \exp[-\frac{1}{2}k(f)(r_1 + r_2)] \cdot R(f) \cdot \exp[-j2\pi f\tau_{Ref}]. \quad (5)$$

对粗糙面的反射引入瑞利因子进行修正,即反射系数为菲涅耳反射系数乘以瑞利因子^[19]。

$$R(f) = \Gamma \cdot e^{-\frac{g}{2}} = \Gamma \cdot \exp(-\frac{8\pi^2 f \sigma^2 \cos^2 \theta_i}{c^2}), \quad (6)$$

式中: Γ 为菲涅耳反射系数; g 为表面的粗糙因子; f 为入射波的频率; σ 是粗糙表面的高度均方根; θ_i 是入射角。考虑电磁波的极化,分为垂直极化(TE)波和水平极化(TM)波。

TE波在粗糙表面上的反射系数通过泰勒近似优化为

$$R_{TE}(f) = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - \sin^2 \theta_i}} \cdot e^{-\frac{g}{2}} \approx \left[1 + \frac{-2 \cos \theta_i}{\cos \theta_i + \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - \sin^2 \theta_i}} \right] \cdot e^{-\frac{g}{2}} \approx \left[1 + \frac{-2 \cos \theta_i}{\sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1}} \right] \cdot e^{-\frac{g}{2}} \approx -\exp\left(\frac{-2 \cos \theta_i}{\sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1}}\right) \cdot e^{-\frac{g}{2}}; \quad (7)$$

TM 波在粗糙表面上的反射系数通过泰勒近似优化为

$$R_{TM}(f) = \frac{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cos \theta_i - \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - \sin^2 \theta_i}}{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cos \theta_i + \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - \sin^2 \theta_i}} \cdot e^{-\frac{g}{2}} \approx -\exp\left(\frac{-2\left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}\right) \cos \theta_i}{\sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1}}\right) \cdot e^{-\frac{g}{2}} \quad (8)$$

图 2 为 $f=300$ GHz, $\sigma=0.1$ mm 时 TE 波的反射系数与反射近似优化后的系数, 显示反射系数与近似模型的反射系数有着良好的近似性, 其中在大入射角入射的情况下吻合度更高。

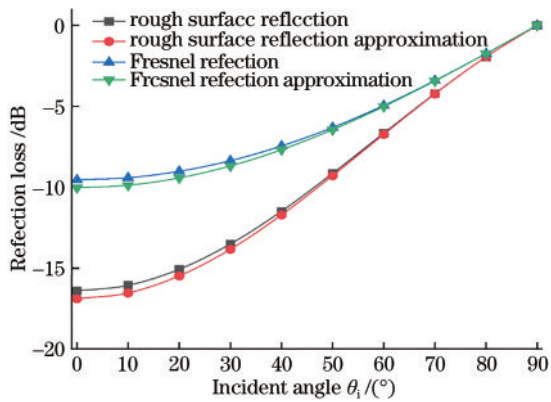


图 2 TE 波反射系数与入射角的关系

Fig. 2 Relationship between reflection loss and incident angle of TE wave

2.3 散射传播模型

由于太赫兹频率较高、波长较短, 散射传播是最关键的传播现象^[20]。太赫兹波入射到粗糙表面上时, 会发生扩散散射现象, 所产生的反射沿着各个方向, 在某些方向上可能会接收更多的能量^[21]。这导致漫射散射在通道建模中非常重要, 因此非镜面散射需要包含在太赫兹传播模型中。假设 $S(f)$ 为散射系数, $H_{Sca}(f)$ 是散射射线的传输函数, 则

$$H_{Sca}(f) = \left(\frac{1}{4\pi f(s_1 + s_2)}\right) \exp\left[-\frac{1}{2}k(f)(s_1 + s_2)\right] \cdot S(f) \cdot \exp[-j2\pi\tau_{Sca}] \quad (9)$$

式中, $\tau_{Sca} = \tau_{LOS} + \frac{s_1 + s_2}{c}$ 为散射射线到达接收器的时间。关于散射系数, 本文基于 Beckman-Kirchhoff 散射理论进行数学推导。

Beckman-Kirchhoff 散射理论可解释光与不透明粗糙表面的波相互作用。起点是 Kirchhoff 积分, 它给出了散射场幅度。一般情况下粗糙表面的散射如图 3

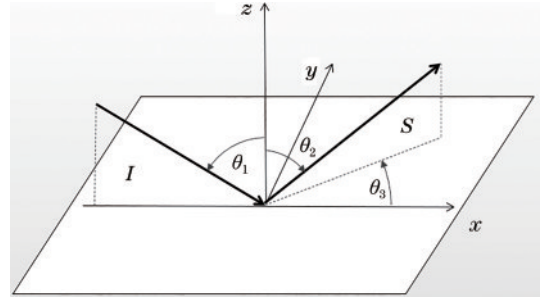


图 3 粗糙表面散射的基本几何学

Fig. 3 Basic geometry of scattering at a rough surface

所示。电磁波以 θ_1 角入射到粗糙表面 S 上被散射到 θ_2 和 θ_3 方向上。

假设粗糙表面不存在尖锐、服从高斯分布。表面的高度均方差 σ 和相关长度 L 是表征粗糙面的两个基本参数^[22]。Kirchhoff 提出的基本假设是, 散射表面任意点处的场都可以用该点切平面上的场来描述, 该场为入射场强和反射场强分量之和, 即

$$E_s = (1 + \Gamma) E_{in} \quad (10)$$

式中: E_s 为散射场强; E_{in} 为入射场强。

定义散射系数为散射场强与镜面反射场强的比值^[23], 即

$$\rho = \frac{E_s}{E_r} \quad (11)$$

式中: ρ 为散射系数; E_r 是在理想导体下的镜面反射场强。垂直极化入射, 发射点与接收点具有相同的距离 r 。理想导体遵循菲涅耳反射, 当 $E_{in}=1$ 时, 场强的表达式为^[23]

$$E_r = \frac{jkA \cos \theta_i e^{jkr}}{\pi r} \quad (12)$$

由式(11)和式(12)得到散射场强为

$$E_s = \frac{2A \cos \theta_i}{\lambda r} \rho \quad (13)$$

散射系数与表面的粗糙程度有关, 表面粗糙程度可以分为轻微粗糙、中等粗糙和非常粗糙 3 大类^[24]。粗糙度的划分由粗糙度因子 g 有关。 g 是表征粗糙表面有效粗糙度的参数, 其表达式为

$$g = k^2 \sigma^2 (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)^2 \quad (14)$$

式中, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, 由式(14)得出粗糙度因子完全由电磁波的入射角、表面的高度均方差 σ 和波长 λ 来决定, 与相关长度 L 无关。

有效粗糙度因子 $g=0$ 时, 为纯镜面反射的光滑表面; $g \ll 1$ 时, 为轻微粗糙表面; $g \approx 1$ 时, 为中等粗糙表面; $g \gg 1$ 时, 为非常粗糙表面。

当方位角 $\theta_3 = 0$, 入射角度与反射角相等, 即 $\theta_1 = \theta_2$, 在 100 GHz 到 1 THz 频率范围内, 入射角度为 60° 、 45° 和 30° 的粗糙因子 g 如图 4 所示。

根据表面的粗糙程度, 理想导体的散射系数为^[24]

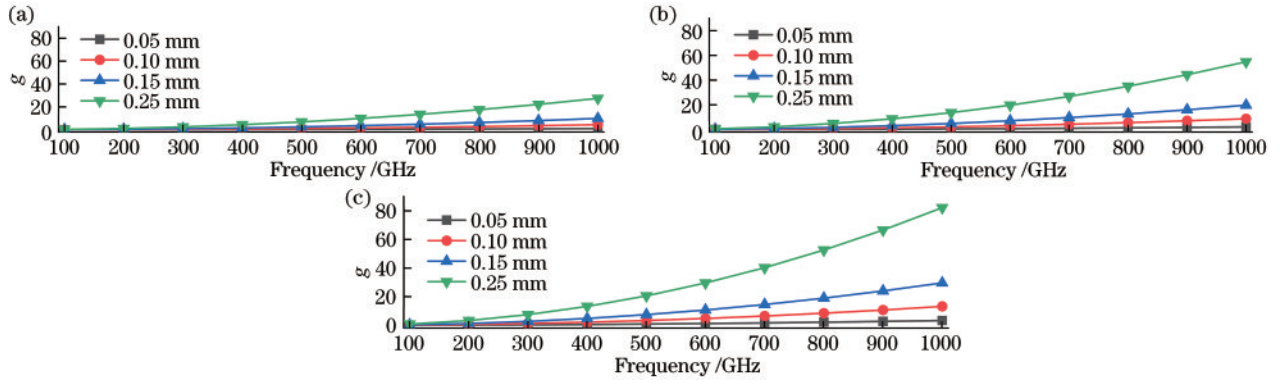


图 4 不同入射角时的粗糙度因子与频率的关系。(a)入射角为 60°; (b)入射角为 45°; (c)入射角为 30°

Fig. 4 Roughness factor versus frequency at different incident angles. (a) Incident angle is 60°; (b) incident angle is 45°; (c) incident angle is 30°

$$\rho_{\infty} = \begin{cases} e^{-\frac{g}{2}} \sqrt{\rho_0^2 + \frac{\pi L^2 F^2}{L_x L_y} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g^m}{m! m} \exp\left[-\frac{(u_x^2 + u_y^2)L^2}{4m}\right]}, & g \ll 1 \\ \sqrt{\frac{\pi L^2 F^2}{L_x L_y v_z^2 \sigma^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g^m}{m! m} \exp\left[-\frac{(u_x^2 + u_y^2)L^2}{4u_z^2 \sigma^2}\right]}, & g \gg 1 \end{cases}, \quad (15)$$

式中参数 ρ_0, v_x, v_y, v_z 和 F 分别为^[25-26]

$$\rho_0 = \sin c(v_x L_x) \cdot \sin c(v_y L_y), \quad (16)$$

$$v_x = k(\sin \theta_1 - \sin \theta_2 \cos \theta_3), \quad (17)$$

$$v_y = k(\sin \theta_2 \sin \theta_3), \quad (18)$$

$$v_z = -\sqrt{\epsilon_2/\epsilon_1} k(\cos \theta_1 + \cos \theta_2), \quad (19)$$

$$F^2 = \cos \theta_{10}. \quad (20)$$

总接收功率 P_{tot} 由镜面反射功率 $P_{specular}$ 和扩散散射功率 $P_{scattering}$ 组成。图 5 显示随着频率的增加, 表面会从光滑变为非常粗糙, 因此会散布更多的功率。因此, 镜面反射功率与总反射功率之比一直衰减, 最后可以忽略不计。总接收功率可以表示为

$$P_{tot} = P_{specular} + P_{scattering} \quad (21)$$

对于散射在镜面反射方向 $\theta_1 = \theta_2, \theta_3 = 0, \rho_0 = 1$, 则有限导体的镜面反射为

$$\rho_{specular finite}^2 = \Gamma^2 \cdot e^{-g}, \quad (22)$$

则镜面反射系数 $R(f)$ 为

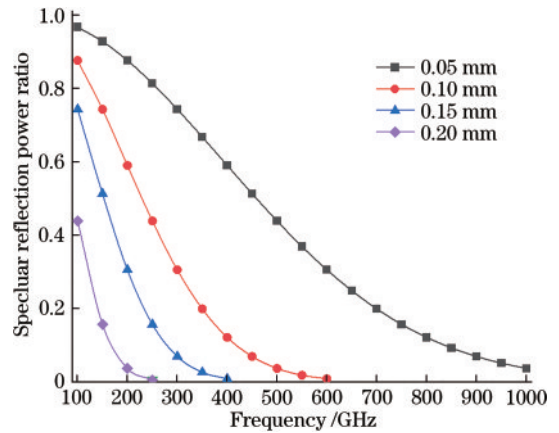


图 5 理想导体粗糙表面镜面反射与总功率的比例

Fig. 5 Ratio of specular reflection to total power of ideal conductor's rough surface

$$R(f) = \Gamma \cdot e^{-\frac{g}{2}}, \quad (23)$$

则有限导体散射系数 $S(f)$ 为

$$S(f) = \begin{cases} \Gamma \cdot e^{-\frac{g}{2}} \cdot \sqrt{\frac{\pi L^2 \cos \theta_1}{L_x L_y} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g^m}{m! m} \exp\left[-\frac{(u_x^2 + u_y^2)L^2}{4m}\right]}, & g \ll 1 \\ \Gamma \cdot \sqrt{\frac{\pi L^2 \cos \theta_1}{L_x L_y v_z^2 \sigma^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g^m}{m! m} \exp\left[-\frac{(u_x^2 + u_y^2)L^2}{4u_z^2 \sigma^2}\right]}, & g \gg 1 \end{cases}. \quad (24)$$

2.4 多射线信道模型的验证

利用射线追踪技术研究太赫兹传输信道, 考虑到太赫兹波超宽带信道的频率依赖性, 将超宽频带划分

为多个独立的子频带。假设每个子带足够窄, 以至于每个子频带具有平坦频率响应。若有 N 个子带, $H_i(f)$ 为第 i 个子带的传输函数:

$$H_i(f) = \begin{cases} \left(\frac{1}{4\pi f d} \right) \exp \left[-\frac{1}{2} k(f) d \right] \cdot \exp \left[-j2\pi f \tau_{\text{LoS}} \right], & \text{direct} \\ \left[\frac{1}{4\pi f (r_1 + r_2)} \right] \exp \left[-\frac{1}{2} k(f) (r_1 + r_2) \right] \cdot R_{\frac{\text{TE}}{\text{TM}}} (f) \cdot \exp \left(-j2\pi f \tau_{\text{Ref}} \right), & \text{reflection} \\ \left[\frac{1}{4\pi f (s_1 + s_2)} \right] \exp \left[-\frac{1}{2} k(f) (s_1 + s_2) \right] \cdot S(f) \cdot \exp \left(-j2\pi f \tau_{\text{Sca}} \right), & \text{scattering} \end{cases} \quad (25)$$

基于 Beckman-Kirchhoff 散射理论,对反射和散射系数进行推导,并对散射系数进行修正。然后建立了太赫兹多射线信道模型。基于文献[19,22]的实验测量数据对信道模型进行验证。如图6所示,模型仿真的反射系数与测量值有比较好的吻合。而散

射系数在小角度的情况下,都有着较高的精确度。在大角度下,本文采用的模型更加适合,仿真结果更加精确。结果验证了该模型的准确性,表明改进的太赫兹信道能够有效、准确地表征太赫兹的传播特性。

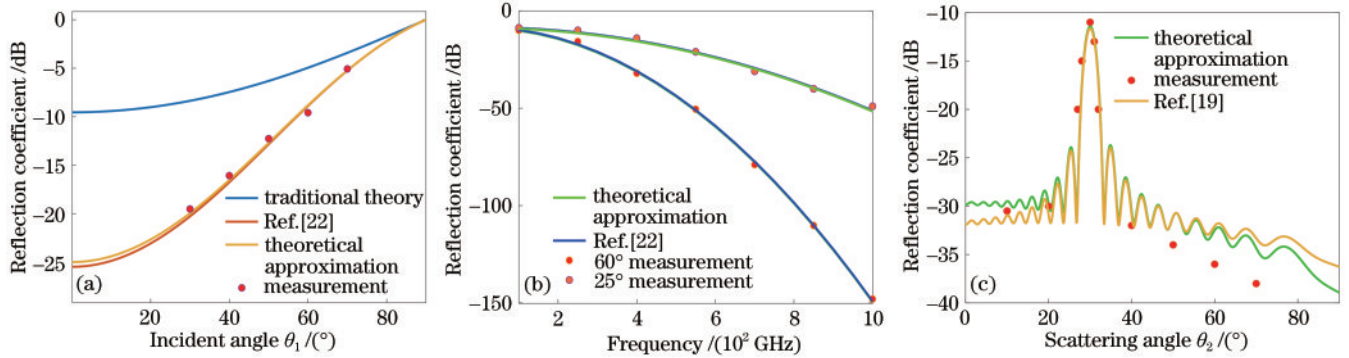


图6 反射系数和散射系数的验证。(a) 350 GHz 频率时反射系数与入射角的关系;(b) 25°和60°入射时反射系数与频率的关系;(c) 30°入射时散射系数与散射角的关系

Fig. 6 Verification of reflection coefficient and scattering coefficient. (a) Relationship between reflection coefficient and incident angle at 350 GHz frequency; (b) relationship between reflection coefficient and frequency with incident angles of 25° and 60°; (c) relationship between scattering coefficient and scattering angle with incident angle of 30°

3 结果分析

选择使用了一个中型办公室场景如图7所示,由于为短距离传播,太赫兹在大气中衰减其影响不超过 2.8 dB/km^[27]。建立坐标系如图,房间的尺寸为 13 m × 12 m × 3 m,桌子的尺寸为 1.6 m × 0.8 m × 1 m。桌子的位置分别位于 (2.8 m, 0.4 m, 1 m)、(5 m, 7.4 m,

1 m) 和 (10.2 m, 11.6 m, 1 m)。针对墙壁表面散射机理对太赫兹信道的特性进行分析。墙体表面石灰的介电常数为 3.69,桌子为光滑的木质材料其介电常数为 1.73,室内材料参数同文献[22]。地面为地毯,反射损耗较大,不予考虑。

将整个频带分解为多个子频带的总和,第 i 个子频带的功率为 P_i ,约束条件为 $\sum_{i=1}^N P_i = P$ 。每个子频带的宽度为 Δf , $\Delta f = f_{i+1} - f_i$,其中, N 是指子带的总数, P 是天线的发射总功率。整个频段的信道容量为多个子信道的容量之和^[28],即

$$C = \Delta f_i \log_2 \left[1 + \frac{|H_i|^2 P_i}{\Delta f_i S_N(f_i)} \right], \quad (26)$$

式中, S_N 是加性高斯白噪声的功率谱密度。在室温下加性高斯白噪声的功率谱密度约为 -85 dBm/GHz^[29]。

将总发射功率设置为 0~10 dBm,由式(26)对信道容量进行计算。对于不同的传输距离,采用 EP 分配和 WF 分配两种方式,得到信道容量如图8所示。

图8(a)表明随着发射功率的增加,在 0.06~1 THz 频段两种分配方式的信道容量都呈现上升的

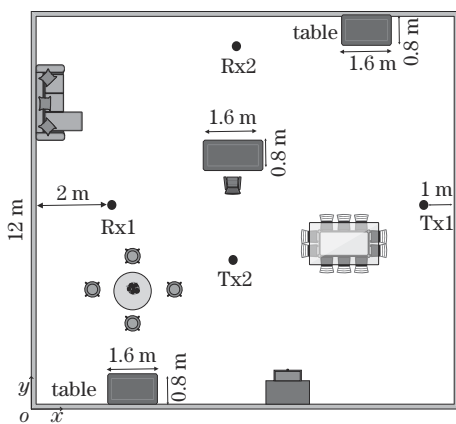


图7 模拟环境的场景图

Fig. 7 Scene diagram of a simulated environment

趋势。在 $d=3$ m 时, WF 分配方式信道容量达到 30 Gbits/s, EP 分配方案容量仅为 3.8 Gbits/s, 容量减少了 87.3%。 $d=10$ m 时的 WF 分配的信道容量甚至高于 $d=3$ m 时的 EP 分配的信道容量。由于非常高的频率选择性, 这表明资源分配在开发太赫兹频谱方面的重要性。

图 8(b) 比较了 $d=3$ m 时, 0.06~1 THz 频带和 100 GHz 带宽的利用效率。在 WF 分配方案下, 在 0.3~0.4 THz 频带上的容量甚至比 EP 分配方案在 0.06~1 THz 频带上的容量还要差, 这显示了大带宽的优势。其次, 由于路径增益的降低, 信道容量随着频率的增加而减小, 0.3~0.4 THz 的信道容量能够达到 0.9~1 THz 信道容量的 10 倍。同时, 在高带宽下, WF 分配会比 EP 分配凸显更大的优势。

图 8(c) 为距离 $d=5$ m 时, 290~310 GHz 频带的信道容量。存在多径的条件下, WF 分配方案的信道容量比 EP 分配提供更高的信道容量。在发射功率为

10 dBm 时, WF 分配容量可以达到 1.34 Gbits/s, 而 EP 分配容量为 0.97 Gbits/s, 信道容量提高了 38.1%。在直射路径的情况下, WF 分配的信道容量和 EP 分配的信道容量几乎没有大的变化。多径的 EP 分配的信道容量与直射路径下的 EP 分配的信道容量几乎相当, 表明了太赫兹通信多径的作用对 EP 分配信道容量几乎没有大的影响。多径的作用对 WF 分配方式是一种增强。

图 8(d) 表明当发射器与接收器距离为 1~10 m, 发射功率 $P=10$ dBm 时, 随着通信距离的增加, 两种分配方式的信道容量都呈现下降的趋势。在 0.06~1 THz, 距离 $d=1$ m 时, WF 分配的信道容量超过 100 Gbits/s, 在距离 $d=10$ m 时, WF 分配信道容量为 4.3 Gbits/s, 在 0.3~0.4 THz, 距离 $d=1$ m 时, WF 分配信道容量为 17.6 Gbits/s, 在距离 $d=10$ m 时, WF 分配的信道容量为 0.22 Gbits/s。由此可见, 太赫兹信道容量对通信距离非常敏感。同时随着距离的增加, 信道容量对距离的敏感程度会降低。

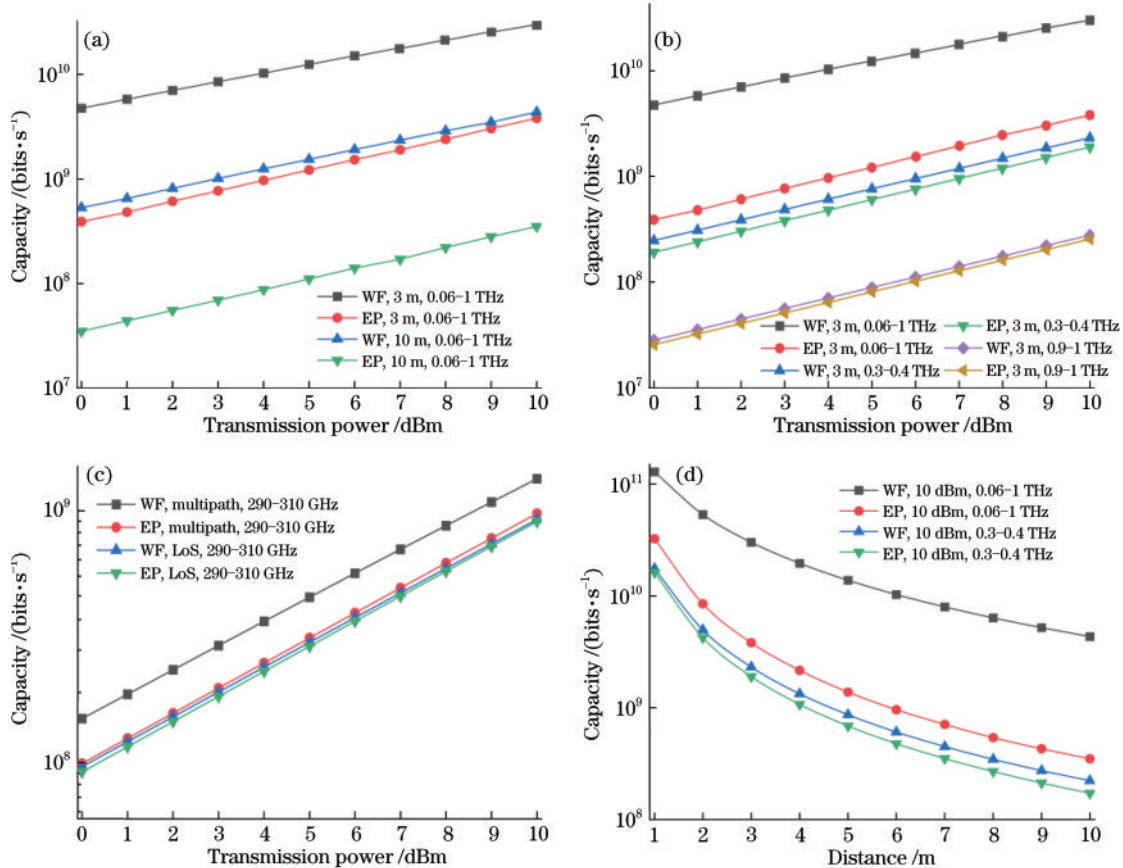


图 8 不同发射功率、距离以及分配方案的信道容量

Fig. 8 Channel capacities for different transmission powers, transmission distances, and power allocation strategies

4 结 论

通过 Beckman-Kirchhoff 散射理论分析了在太赫兹频段粗糙度对反射、散射的影响, 对反射系数与散射系数进行了修正。引入瑞利因子, 对低粗糙度的散射系数进行修正, 解决了反射与散射系数重复计算的问

题。针对不同粗糙度, 也引入高粗糙度散射系数。同时基于射线追踪方法, 给出了准确的太赫兹多射线信道模型, 该模型结合了直射路径、反射路径、散射路径的传播模型, 并对模型进行了验证。其次, 使用此模型对信道容量进行了分析。得出了在 10 dBm 发射功率和 0.06~1 THz 的 WF 分配策略时, $d=3$ m 信道容量

可以超过 30 Gbits/s, 而 EP 分配方式信道容量仅有 3.8 Gbits/s, WF 分配方式可以大大提高信道容量。并且当带宽越大时, 使用 WF 分配方式对信道容量提升效果明显。而在相同带宽时, 频率越低, 信道容量越大。信道容量随通信距离增大衰减严重, WF 算法可以减缓信道容量的衰减。这表明资源分配在开发太赫兹频谱方面的重要性。该工作给出了完整、精确的多射线信道模型, 并对信道容量进行了深入的分析, 为可靠、高效的太赫兹通信系统设计与网络布局提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Song H J, Nagatsuma T. Present and future of terahertz communications[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, 1(1): 256-263.
- [2] Piesiewicz R, Kleine-Ostmann T, Krumbholz N, et al. Short-range ultra-broadband terahertz communications: concepts and perspectives[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2007, 49(6): 24-39.
- [3] Kürner T, Priebe S. Towards THz communications-status in research, standardization and regulation[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2014, 35(1): 53-62.
- [4] Chen Z, Ma X Y, Zhang B, et al. A survey on terahertz communications[J]. *China Communications*, 2019, 16(2): 1-35.
- [5] Molisch A F. Ultrawideband propagation channels-theory, measurement, and modeling[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2005, 54(5): 1528-1545.
- [6] Guan K, Li G K, Kürner T, et al. On millimeter wave and THz mobile radio channel for smart rail mobility[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(7): 5658-5674.
- [7] Choi Y, Choi J W, Cioffi J M. A geometric-statistic channel model for THz indoor communications[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2013, 34(7/8): 456-467.
- [8] Vegni A M, Loscrí V. Chirality effects on channel modeling for THz-band wireless communications in LoS/NLoS propagation[J]. *Nano Communication Networks*, 2016, 10: 27-37.
- [9] Mohasseb Y Z, Fitz M P. A 3-D spatio-temporal simulation model for wireless channels[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, 20(6): 1193-1203.
- [10] 宋鹏, 刘春, 朱磊, 等. 移动场景下无线紫外光通信单次散射路径损耗分析[J]. *光学学报*, 2020, 40(4): 0406001.
Song P, Liu C, Zhu L, et al. Analysis of single-scatter path loss in wireless ultraviolet communication in mobile scene[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(4): 0406001.
- [11] Priebe S, Kürner T. Stochastic modeling of THz indoor radio channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(9): 4445-4455.
- [12] Degli-Esposti V, Fuschini F, Vitucci E M, et al. Measurement and modelling of scattering from buildings[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(1): 143-153.
- [13] Degli-Esposti V. A diffuse scattering model for urban propagation prediction[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2001, 49(7): 1111-1113.
- [14] Han C, Bicen A, Akyildiz I F. Multi-ray channel modeling and wideband characterization for wireless communications in the terahertz band[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(5): 2402-2412.
- [15] 南久航, 韩一平. 双路多进制涡旋光通信[J]. *光学学报*, 2021, 41(12): 1206001.
Nan J H, Han Y P. Dual-channel multiband vortex optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1206001.
- [16] 赵太飞, 史海泉, 梁浩, 等. 无线紫外光 MIMO 通信线性注水功率分配方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(22): 2206002.
Zhao T F, Shi H Q, Liang H, et al. Linear water-filling power allocation method in wireless MIMO ultraviolet communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(22): 2206002.
- [17] Zhang C J, Han C, Akyildiz I F. Three dimensional end-to-end modeling and directivity analysis for graphene-based antennas in the terahertz band[C]//2015 IEEE Global Communications Conference, December 6-10, 2015, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2015.
- [18] Jornet J M, Akyildiz I F. Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(10): 3211-3221.
- [19] Piesiewicz R, Jansen C, Mittleman D, et al. Scattering analysis for the modeling of THz communication systems[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(11): 3002-3009.
- [20] Sheikh F, Lessy D, Kaiser T. A novel ray-tracing algorithm for non-specular diffuse scattered rays at terahertz frequencies[C]//2018 First International Workshop on Mobile Terahertz Systems (IWMTS), July 2-4, 2018, Duisburg, Germany. New York: IEEE Press, 2018.
- [21] Priebe S, Jacob M, Jansen C, et al. Non-specular scattering modeling for THz propagation simulations[C]//Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), April 11-15, 2011, Rome, Italy. New York: IEEE Press, 2011.
- [22] Jansen C, Priebe S, Moller C, et al. Diffuse scattering from rough surfaces in THz communication channels[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, 1(2): 462-472.
- [23] Beckmann P, Spizzichino A. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces[M]. Norwood: Artech House, 1963.
- [24] Nayar S K, Ikeuchi K, Kanade T. Surface reflection: physical and geometrical perspectives[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, 13(7): 611-634.

- [25] Guo R P, Tao Z S. The modified Beckmann-Kirchhoff scattering theory for surface characteristics in-process measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(11): 1205-1211.
- [26] Ragheb H, Hancock E R. The modified Beckmann-Kirchhoff scattering theory for rough surface analysis[J]. *Pattern Recognition*, 2007, 40(7): 2004-2020.
- [27] Song H J, Nagatsuma T. *Handbook of terahertz technologies: devices and applications*[M]. United Square: Jenny Stanford Publishing, 2015.
- [28] Sheikh F, Gao Y, Kaiser T. A study of diffuse scattering in massive MIMO channels at terahertz frequencies[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(2): 997-1008.
- [29] Han C, Akyildiz I F. Three-dimensional end-to-end modeling and analysis for graphene-enabled terahertz band communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(7): 5626-5634.