

基于可编程无线环境的太赫兹频段多射线信道模型

罗文宇, 刘河潮

(华北水利水电大学物理与电子学院, 河南 郑州 450046)

摘要: 基于可编程无线环境的太赫兹通信系统允许针对不同无线设备以最适宜的方式进行电磁波传播的编程定制, 不仅能够改善严重的衰落、干扰和非视距问题, 还能显著提升系统的安全性和隐私性。针对可编程无线环境中太赫兹无线通信的信道建模问题, 首先基于射线跟踪技术, 结合视距、非视距的传播模型建立了太赫兹波段可编程无线环境的多射线信道模型。然后, 在所建立传播模型的基础上, 进一步研究了反射系数、注水功率分配策略下的宽带信道容量、均方根时延扩展等问题。实验仿真和分析结果表明, 可编程无线环境通过对电磁波传输的主动干预, 大大减轻了太赫兹室内无线传播中路径损耗和多径衰落的影响, 提高了系统的传输容量。所提模型为后期太赫兹通信系统, 尤其是室内太赫兹通信系统的设计提供了参考依据。

关键词: 可编程无线环境; 射线跟踪; 太赫兹; 多径

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019161

Multi-ray channel modeling for programmable wireless environments in the terahertz band

LUO Wenyu, LIU Hechao

School of Physics and Electronics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China

Abstract: Terahertz communication system based on programmable wireless environment allowed programming customization of electromagnetic wave propagation in the most suitable ways for different wireless devices. It could not only improve serious fading, interference and non-line-of-sight problems, but also significantly enhance the security and privacy of the system. The channel modeling of terahertz wireless communication in programmable wireless environment was focused. Firstly, a multi-ray channel model for terahertz-band programmable wireless environment was established based on ray tracing technology as well as the propagation model of line-of-sight and non-line-of-sight. Then, based on the established propagation model, reflection coefficient, the broadband channel capacity under the water-filling power allocation algorithm and the RMS delayed extension were further studied. The simulation and analysis results show that the programmable wireless environment greatly reduces the influence of path loss and multipath fading in terahertz wireless transmission through active interference in electromagnetic wave transmission, improves the transmission capacity of terahertz communication system, which provides a reference for the later design of terahertz communication system, especially indoor terahertz communication system.

Key words: programmable wireless environment, ray-tracing, terahertz band, multipath

1 引言

随着大容量、高速低时延通信需求的爆发式增长, 即使是新一代无线通信系统, 仍然面临着巨大

的挑战。由于能够提供从几十吉赫兹到几太赫兹的带宽, 面向太赫兹频段的通信技术有望解决当前无线通信系统频谱稀缺和容量限制的问题, 并促进大量新的应用^[1-2]。然而对于太赫兹频段, 即使特别小

收稿日期: 2019-03-22; 修回日期: 2019-06-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U1804148)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.U1804148)

的物体也会成为散射体，信号受衰落的影响较大，从而限制了通信设备的连接半径^[3-4]。在 60 GHz 及以上频段，非视距 (NLoS, non-line-of-sight) 传输无线环境下甚至很难实现有效通信^[5]。因此，面向太赫兹频段的无线通信技术需要充分考虑并克服衰落、时延等因素的影响。

近年来，出现了利用可编程的方式人为地控制无线传播环境特性的新技术，该技术利用可编程超表面加强透镜效应及其模块单元超贴片能够任意调控反射角的功能，来减轻无线传播的路径损耗，被用以增加电磁波的传输距离和解决 NLoS 传输问题。因此，针对可编程无线环境中通信技术的研究越来越受到学者们的关注，如文献[6-9]等。与传统改善通信距离的方法不同，该技术并不刻意利用复杂信号处理的手段控制收发设备，而是另辟蹊径地在电磁波传播过程中实施调控^[10-11]，因此并不会通过提高发射功率或者利用中继在无线环境中发射更多的能量^[12]。可编程无线环境的思想最早由文献[13]提出，即 HyperSurFace，该思想最重要的组成部分是一种可互连、完全自适应的可编程超表面。该超表面内部集成控制器组，能够在本地交互并进行全局通信，以获得灵活可变的电磁特性^[14]。由于大气中分子吸收引起的衰减在某些情况下并不显著^[15]，损失通常只有 10^{-5} dB/m^[16]。在太赫兹无线通信中，只要能够在一定程度上降低衍射、反射和散射带来的影响，就能够降低信号衰减、消除多径影响。一般太赫兹通信信道模型主要包含反射、衍射、散射等^[17]，而在可编程无线环境中，能够用软件对收发链路周围智能表面、墙壁、阵列等在物理层中的电磁特性进行有效的控制，从而以完全可定制的方式操控无线电波的传播，使无线传输中只存在直达径和反射径^[18-19]。因此，可编程无线环境具备抑制路径损耗和多径衰落的能力，进而有效提高接收信号的质量^[20]。此外，可编程无线环境对天线单元的辐射方式几乎没有限制，很容易避免相互耦合效应和天线单元之间的相关性。

尽管可编程无线环境为太赫兹无线通信带来了诸多好处，但基于可编程无线环境的太赫兹通信系统设计仍需要解决各种各样的实际问题，其中，面向可编程无线环境建立一种能够准确描述太赫兹频谱特性的无线信道模型最为重要。因此，针对可编程无线环境的太赫兹无线信道建模问题，本文在分析可编程超表面电磁波控制原理的基础上，建立了能够精确表

征反射系数、宽带信道容量、均方根 (RMS, root-mean squared) 时延扩展等特征的多射线信道模型，该模型在抑制太赫兹无线路径损耗和多径衰落等方面有优异的表现，能大大提高系统传输容量。

2 可编程无线环境中太赫兹多射线模型

由于太赫兹电磁波的波长非常短，射线跟踪技术具有非常好的预测能力^[21]，利用射线光学的方法能够得到较精确的传输模型。本文基于几何光学原理，利用多射线追踪技术研究可编程无线环境中太赫兹传输模型，包括视距 (LoS, line-of-sight)、反射、散射、衍射等。此外，太赫兹频段具有较宽的频带，无线信道传输具有频率相关性，因此，在进行多射线跟踪建模时，需要将太赫兹频段划分为多个子带单独分析。不失一般性，假设每个子带带宽足够窄，以至于子带内具有平坦的频率响应。

可编程无线环境中，电磁超表面对电波传播特性的影响如图 1 所示^[22]，且遵循广义斯涅尔定律。超表面单元及其相互连接的动态开关控制元件能够影响超表面的表面电流，总表面电流包含入射波在超表面上感应的电流、其他超表面单元通过无线感应引起的单元电流及开关元件状态变化引起的向内或向外的电流。超表面整体电磁响应可以由总表面电流的激励场得出，因此通过调控开关单元状态可以完全重构入射电磁波，从而以软件可编程的方式产生可定制的电磁响应^[23]。

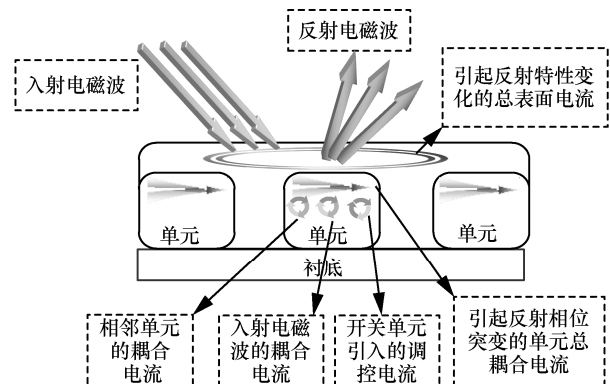


图1 可编程超表面电磁波控制原理

假设系统中太赫兹工作频段共分为 I 个子带，每个子带可表示为 $i \in \{1, \dots, I\}$ ，对于第 i 个子带，利用 N_i 个射线叠加表示其信道冲激响应。第 n 个射线的衰减和时延分别为 $\alpha_{i,n}$ 和 τ_n ，而时延 $\tau_n = \frac{r_n}{c}$ 与时间无关，其中， r_n 为传输距离， c 为光

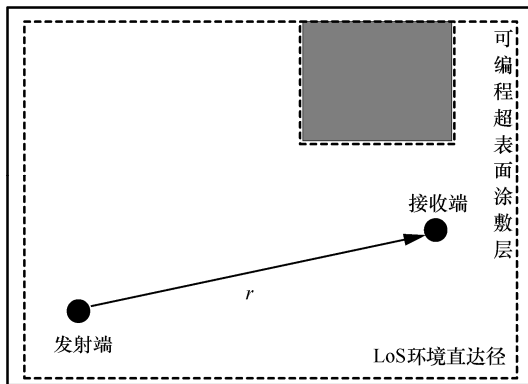
速。因此， t 时刻第 i 个子带的多射线信道模型可以表示为

$$h_i(\tau, t) = \sum_{n=1}^{N_i(t)} \alpha_{i,n}(t) \delta(\tau - \tau_n) \quad (1)$$

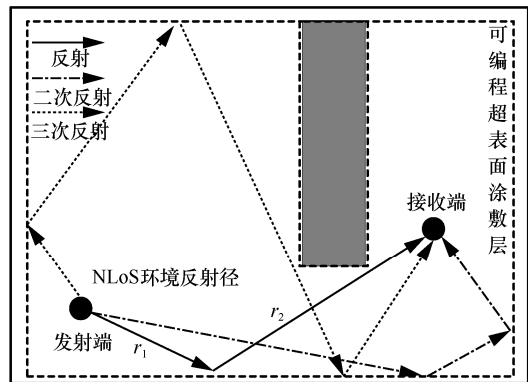
对于线性时不变 (LTI, linear time-invariant) 系统, 省略信道模型中的时间参数, 可将式(1)表示为

$$h_i(\tau) = \sum_{n=1}^{N_i} \alpha_{i,n} \delta(\tau - \tau_n) \quad (2)$$

可编程无线环境的无线信道模型如图 2 所示。可编程无线环境中, 由于发射端和接收端周围完全被可编程超表面涂敷, 可以通过软件控制的方式将反射、散射和衍射到周围环境中的射线反射到接收端, 因此, 多射线在空中的传输最终只受空气分子的吸收及可编程超表面控制射线的效率两方面因素的影响 (本文立足于理想的可编程电磁超表面及其构成的可编程无线环境, 因此并不考虑动态调控及外部因素对超表面性能的影响)。



(a) LoS环境直达径



(b) NLoS环境反射径

图 2 可编程无线环境无线信道模型

2.1 直达径传播

LoS 环境主要包括直达径传输。从发射端到接

收端的过程中, 直达径会受到包括反射、散射、衍射以及吸收等空气分子的影响。除了吸收损耗之外, 其他影响的总和可以建模为

$$H_{\text{Spr}}(f) = \frac{c}{4\pi f r} \quad (3)$$

在太赫兹频段, 波长与粗糙表面的尺度相当, 低频段相对光滑的表面在太赫兹频段仍显得粗糙。因此, 太赫兹波传播的一个主要挑战在于周围环境的粗糙表面使电磁波大量散射到空中。而对于可编程无线环境, 周围环境均被可编程超表面涂敷, 被软件操控的超表面可以将入射的电磁波通过最优路径转发到接收端, 如图 2(b)所示。因此, 由于周围存在可编程超表面, 反射、散射及衍射的部分还是可以通过可编程超表面对电磁波的调控到达接收端, 只存在吸收损耗, 因此在理想情况下, $H_{\text{Spr}}(f) = 1$ 。对于可编程无线环境, LoS 环境可以建模为

$$H_{\text{LoS}}(f) = H_{\text{Abs}}(f) e^{-j2\pi f \tau_{\text{LoS}}} \quad (4)$$

其中, 分子吸收损耗函数为

$$H_{\text{Abs}}(f) = e^{-\frac{1}{2}k(f)r} \quad (5)$$

其中, r 表示发射与接收之间的距离; $\tau_{\text{LoS}} = \frac{r}{c}$ 表示射线传播时延。吸收损耗是电磁波能量在传播介质中转化为分子内部动能的部分, 可用比尔-朗伯定律计算; k 是一个与频率相关的吸收损耗参数, 可以表示为

$$k(f) = \sum_q \frac{p}{p_0} \frac{T_{\text{STP}}}{T} Q^q \sigma^q(f) \quad (6)$$

其中, p 表示开氏温标下的系统压力, p_0 表示参考压力, T_{STP} 表示标准压力下的温度, Q^q 表示气体 q 每单位包含的分子数目, σ^q 表示气体 q 的吸收截面。在太赫兹频段的规则介质中, 对总吸收的主要贡献来自水蒸气的分子^[24]。因此, 式(2)可以表示为

$$h_i(\tau) = \alpha_{\text{LoS}}^{(i)} \delta(\tau - \tau_{\text{LoS}}) \Gamma_{\text{LoS}} + \sum_{p=1}^{N_{\text{Ref}}^{(i)}} \alpha_{\text{Ref}}^{(i,p)} \delta(\tau - \tau_{\text{Ref}}^{(p)}) \quad (7)$$

其中, $\alpha_{\text{LoS}}^{(i)}$ 表示第 i 个频率子带 LoS 环境直达径的衰减, $\alpha_{\text{Ref}}^{(i,p)}$ 表示第 i 个频率子带第 p 个反射径的衰减, $\tau_{\text{Ref}}^{(p)}$ 表示第 p 个反射径的时延, $N_{\text{Ref}}^{(i)}$ 表示第 i 个频率子带的反射射线总数, $\Gamma_{\text{LoS}} \in \{0, 1\}$ 表示 LoS

环境指示因子, $\Gamma_{\text{LoS}}=1$ 表示收发间存在直达径, $\Gamma_{\text{LoS}}=0$ 表示不存在直达径。通过引用 Wiener-Khinchin 定理, 第 i 个频率子带中的各个衰减可以分别表示为各个电磁波多径传输函数的模, 即 $|H_{\text{LoS}}(f_i)|$ 和 $|H_{\text{Ref}}^p(f_i)|$, 其中 f_i 表示第 i 个频率子带的中心频率。

2.2 反射径传播

假设 $R(f)$ 表示频率 f 所在频段电磁波的反射系数, 可以利用 Kirchhoff 理论获取镜面反射中的反射系数, r_1 、 r_2 分别表示发射端与反射点、反射点与接收端之间的距离, 则反射射线的传输函数表示为

$$H_{\text{Ref}}(f) = R(f) e^{-j2\pi f \tau_{\text{Ref}} - \frac{1}{2}k(f)(r_1+r_2)} \quad (8)$$

其中, $\tau_{\text{Ref}} = \frac{r_1+r_2}{c}$ 表示反射射线的时延。传统环境中, 反射系数依赖于障碍物在反射点位置的材料、形状以及表面形状的粗糙程度。因此, 在传统的无线环境中, 反射系数通常为从菲涅耳方程导出的光滑表面反射系数 $\gamma_{\text{TE}}(f)$ 乘以瑞利粗糙度因子 ρ ^[17]。然而, 在可编程无线环境中, 可以控制可编程超表面将入射的电磁波沿着无损耗的最佳路径传输到接收端。因此, 在可编程超表面的入射点可以看作镜面反射, 即瑞利粗糙度因子 $\rho=1$, 此时 $R(f)$ 可表示为

$$R(f) = \frac{\cos(\theta_i) - n_t \sqrt{1 - \left(\frac{1}{n_t} \sin(\theta_i)\right)^2}}{\cos(\theta_i) + n_t \sqrt{1 - \left(\frac{1}{n_t} \sin(\theta_i)\right)^2}} = -\left(1 + \frac{-2\cos(\theta_i)}{\cos(\theta_i) + \sqrt{n_t^2 - \sin^2(\theta_i)}}\right) \approx -\left(1 + \frac{-2\cos(\theta_i)}{\sqrt{n_t^2 - 1}}\right) \approx -\exp\left(\frac{-2\cos(\theta_i)}{\sqrt{n_t^2 - 1}}\right) \quad (9)$$

其中, θ_i 表示反射点入射波的入射角, 可以根据发射、接收及反射点的位置的余弦定理得出, 如图 2(b) 所示, $\theta_i = \frac{1}{2} \cos^{-1}\left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - r^2}{2r_1r_2}\right)$, 其中 r 是发射端与接收端之间的距离; n_t 表示折射率, 随频率和介质材料而变化^[25]。在考虑大入射角时, 式(9)中光滑

表面反射系数的泰勒近似在太赫兹频率上具有良好的精度, 负号表示 π 的相位变化。

2.3 可编程无线环境多射线信道建模

结合以上直达径传播和反射径传播的分析, 合并式(7)~式(9), 即可得到可编程无线环境太赫兹多射线信道模型为

$$h_i(\tau) = \left| e^{-\frac{1}{2}k(f_i)\tau} \right| \delta(\tau - \tau_{\text{LoS}}) \Gamma_{\text{LoS}} + \sum_{p=1}^{N_{\text{Ref}}^{(i)}} \left| -e^{\left(\frac{-2\cos(\theta_i)}{\sqrt{n_t^2 - 1}}\right)} e^{-\frac{1}{2}k(f_i)(r_1+r_2)} \right| \delta(\tau - \tau_{\text{Ref}}^{(p)}) \quad (10)$$

3 可编程无线环境太赫兹通信分析

利用建立的可编程无线环境太赫兹通信多射线传播模型, 本节对太赫兹频段的宽带信道特性进行详细分析, 内容包括无线宽带信道容量、均方根时延扩展和相干带宽。

3.1 无线宽带信道容量

根据第 2 节的分析, 为了评估宽带信道容量, 先将可编程无线环境太赫兹工作带宽分解为多个子带的集合。将第 i 个子带定义为 $\Delta f_i = f_{i+1} - f_i$, 该子带发射信号功率为 P_i , $\sum_{i=1}^{N_B} P_i \leq P$, 其中, N_B 表示所有子带数, P 表示总的发射功率, 则子带容量 C_i 可表示为

$$C_i = \Delta f_i \text{lb} \left(1 + \frac{|h_i|^2 P_i}{\Delta f_i S_N(f_i)} \right) \quad (11)$$

其中, S_N 表示加性高斯白噪声的功率谱密度。根据文献[24], 整个宽带信道容量可以表示为多个子带容量之和, 即

$$C = \sum_{i=1}^{N_B} \Delta f_i \text{lb} \left(1 + \frac{|h_i|^2 P_i}{\Delta f_i S_N(f_i)} \right) \quad (12)$$

3.2 均方根时延扩展和相干带宽

在对无线信道的刻画中, 通常用时域的均方根时延扩展和频域的相干带宽这 2 个参数来描述多径信道的时间色散特性。均方根时延扩展是多径信号的功率时延分布的二阶矩的平方根, 而相干带宽是从均方根时延扩展得出, 两者成反比关系。因此, 本文只分析均方根时延扩展的解析表达式, 即

$$\sigma_i = \sqrt{\tau_i^2 - (\bar{\tau}_i)^2} \quad (13)$$

$$\text{其中, } \bar{\tau}_i = \frac{\sum_{n=1}^N |\alpha_{i,n}|^2 \tau_n}{\sum_{n=1}^N |\alpha_{i,n}|^2} \text{ 和 } \overline{\tau_i^2} = \frac{\sum_{n=1}^N |\alpha_{i,n}|^2 \tau_n^2}{\sum_{n=1}^N |\alpha_{i,n}|^2}$$

分别是瞬时功率时延分布的一阶矩（或称为平均过量时延）和二阶矩。 $\alpha_{i,n}$ 是式(2)的第*i*个子带中第*n*条射线的幅度。

4 仿真分析

由于每一个子带足够窄，子带内部的衰落可以看作平坦衰落。此外，与传统环境中的多射线模型不同，可编程无线环境中的信道线模型可以简化为LoS和反射径的线性叠加。为了验证可编程无线环境多射线信道模型，参考文献[26]选定的室内空间维度5 m×2.75 m×2.5 m。空间内所有墙壁、屋顶、地面及遮挡物均被可编程超表面涂敷，LoS环境下收发距离为3 m， $f_i = 0.3 \text{ THz}$ 。

传统多射线信道模型中不仅包括LoS路径，还包括反射、散射、衍射等路径。然而，在可编程无线环境中，由于电磁超表面对电磁波的超强调控能力，多射线信道中接收信号仅由LoS和NLoS环境中的反射射线组成。本节的仿真首先验证反射系数，然后对子带多射线模型宽带信道容量以及相干带宽进行验证分析。

4.1 反射系数

图3分别以频率和入射角为变量对传统多射线信道与可编程无线环境多射线信道的反射系数进行了对比分析。由图3(a)可知，随着频率的增加，传统多射线信道中反射系数逐渐降低。这是因为对于较小的电磁波波长，传统环境中相同的粗糙墙面的反射损耗更严重。对于可编程无线环境，电磁波反射被完全控制，并不随频率的增加发生明显的变化。

由图3(b)可知，随着入射波接近垂直于表面即入射角接近零，无论是传统环境还是可编程无线环境都会损失更多的能量。对于相同的入射角，可编程无线环境的反射系数要高于传统环境的反射系数。

4.2 宽带信道容量

图4假设发射功率为0~10 dBm，利用的频段为0.1~1 THz，发射端和接收端的距离为3 m。采用2种功率分配模式，一种是平均功率分配策略，另一种是注水功率分配策略。由图4可知，多径信道容量随发射功率的增加而增大。对于传统无线环

境，注水功率分配策略比平均功率分配策略的多径信道容量更大。这是因为在太赫兹频段，信道具有更高的频率选择性，注水功率分配对于更优的路径分配更多的功率，而对整个容量贡献较小的路径分配更少的功率。对于可编程无线环境，由于利用了可编程电磁超表面对电磁波的调控能力，自定义射线引导功能，太赫兹波在传输过程中衰减和时延大幅度降低，多径信道容量也得到了大幅增加。在可编程无线环境中，注水功率分配策略和平均功率分配策略多径信道容量相差不大，这是因为可编程无线环境路径本身就是经过软件控制优选的高质量路径。该结果表明，在可编程无线环境中，可以采用更低成本的功率分配方式，其性能并没有明显的差异。

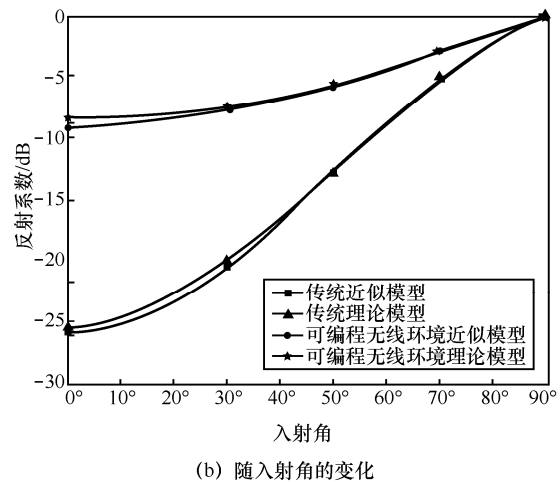
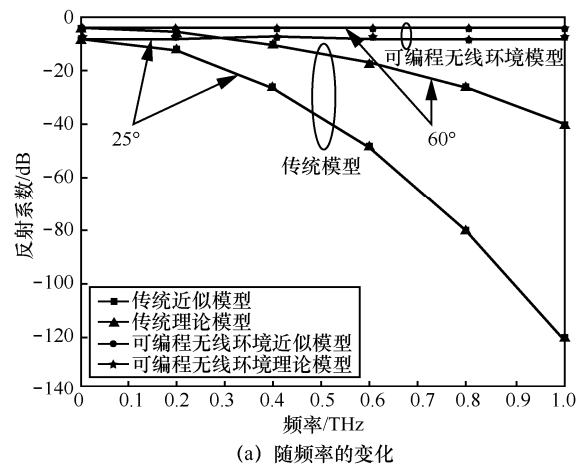


图3 2种信道的反射系数对比曲线

4.3 相干带宽

相干带宽定义为信道相关度超过50%的频率范围，表示为 $\frac{0.2}{\sigma_i}$ 。由图5可知，对于传统的无线环境，随着频率的升高，电磁波波长与周围环境粗

糙表面的尺度也越接近,电磁波散射带来的损耗也变得越严重。由于传播路径的高损耗,增加频率将导致多径效应减小,从而导致更小的时延扩展,以获得较大的相关带宽。然而,对于可编程无线环境,频率的增加并没有带来损耗的增加,因此其多径效应和相干带宽并不会随着频率的升高而显著改变。

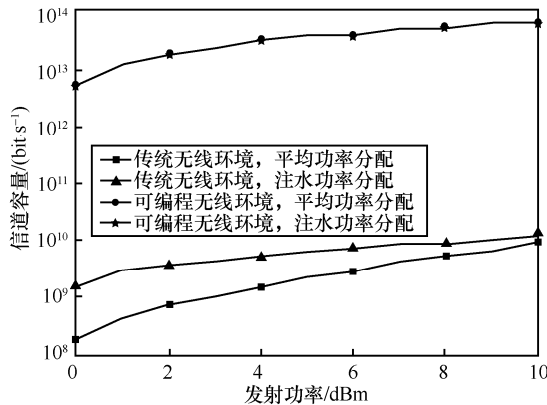


图4 信道容量与发射功率的关系

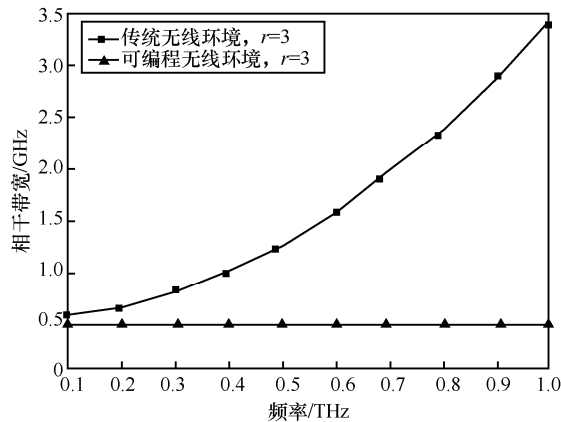


图5 相干带宽与频率的关系

5 结束语

本文利用射线跟踪技术,提出了基于可编程无线环境的太赫兹多射线信道模型。由于可编程无线环境对电磁波幅度、相位、极化等特征的超强调控能力,消除了散射、衍射等现象对电磁波带来的损耗,基于该多射线追踪模型建立的系统具有更优异的性能。此外,本文还对该模型下的信道特征进行了解析,并在平均功率分配和注水功率分配的条件下对传统无线环境太赫兹通信与可编程无线环境太赫兹通信进行了仿真分析。下一步可进行以下2个方面的工作:1)在本文所提模型的基础上,提出

具体的面向可编程无线环境的太赫兹通信技术;2)详细分析容量、覆盖、能效等指标,研究可编程无线环境下太赫兹无线通信系统性能提升的理论上限。

参考文献:

- [1] MATAMOROS J, ANTON-HARO C. Optimal network size and encoding rate for wireless sensor network-based decentralized estimation under power and bandwidth constraints[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(4): 1121-1131.
- [2] ELAY H, STEF C, SHU R M, et al. End-to-end noise model for intra-body terahertz nanoscale communication[J]. IEEE Transactions on Nano Bioscience, 2018, 17(4): 464-473.
- [3] AKYILDIZ I F, HAN C, NIE S. Combating the distance problem in the millimeter wave and terahertz frequency bands[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(6): 102-108.
- [4] LIASK C, NIE S, TSIOLARIDOU A, et al. Realizing wireless communication through software-defined hyperSurface environments[C]//2018 IEEE 19th International Symposium (WoWMoM). IEEE, 2018: 14-15.
- [5] AKYILDIZ I F, NIE S, LIN S C, et al. 5G roadmap: 10 key enabling technologies[J]. Computer Networks, 2016, 106(1): 17-48.
- [6] TSIOLARIDOU A, LIASKOS C K, IOANNIDIS S. Towards a circular economy via intelligent metamaterials[C]//2018 IEEE International Conference (CAMAD). IEEE, 2018: 21-25.
- [7] LIASKOS C, TSIOLARIDOU A, PITSILLIDES A, et al. Using any surface to realize a new paradigm for wireless communications[J]. Communications of the ACM, 2018, 61(11): 30-33.
- [8] TAN X, SUN Z, KOUT D. Enabling indoor mobile millimeter-wave networks based on smart reflect-arrays[C]//2018 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). IEEE, 2018: 39-44.
- [9] HU S, RUSEK F, EDFORS O. Beyond massive MIMO: the potential of data transmission with large intelligent surfaces[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(10): 2746-2758.
- [10] AIJAZ A, SIMSEK M, DOHLER M, et al. Shaping 5G for the tactile Internet[M]. Berlin: Springer Publishing Company, 2017.
- [11] AKYILDIZ I F, PIER M, BAL S, et al. The Internet of BIO-NANO things[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(3): 32-40.
- [12] FAN K, ZHAO X G, ZHANG J D, et al. Optically tunable terahertz metamaterials on highly flexible substrates[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2013, 3(6): 702-708.
- [13] LIASKOS C, TSIOLARIDOU A, PITSILLIDES A, et al. Design and development of software defined metamaterials for nanonetworks[J]. IEEE Circuits and Systems Magazine, 2015, 15(4): 12-25.
- [14] ABADAL S, LIASKOS C, TSIOLARIDOU A, et al. Computing and communications for the software-defined metamaterial paradigm: a context analysis[J]. IEEE Access, 2017, 5(8): 6225-6235.
- [15] CHEN J, STEINMETZER D, CLASSEN J, et al. Pseudo lateration: millimeter-wave localization using a single RF chain[C]//2017 Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2017: 1-6.
- [16] PI Z, CHOI J, HEATH R. Millimeter-wave gigabit broadband evolution toward 5G: fixed access and backhaul[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(4): 138-144.

- [17] HAN C, BICEN A O, 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.
- [18] YU N, GENEVET P, KATS M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. Science, 2011, 334(6054): 333-337.
- [19] HOLLOWAY C L, KUESTER E F, GORDON J A, et al. An overview of the theory and applications of metasurfaces: the two-dimensional equivalents of metamaterials[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2012, 54(2): 10-35.
- [20] TAGHVAEE H, ABADAL S, GEORGIU J, et al. Fault tolerance in programmable metasurfaces: the beam steering case[C]//2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). IEEE, 2019: 113-118.
- [21] KÜRNER T, PRIEBE S. Towards THz communications-status in research, standardization and regulation[J]. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2013, 35(1): 53-62.
- [22] LIASKOS C, TSIOLARIDOU A, PITILAKIS A, et al. Joint compressed sensing and manipulation of wireless emissions with intelligent surfaces[C]//2019 The International Workshop on IoT Applications and Industry 4.0 (IoTI4). 2019: 132-135.
- [23] LUCY S. Advanced RF MEMS[M]. New York: Cambridge University Press, 2010.
- [24] 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.
- [25] PIESIEWICZ R, KLEINE-OSTMANN T, KRUMBHOLZ N, et al. Terahertz characterisation of building materials[J]. Electronics Letters, 2005, 41(18): 1002-1004.
- [26] 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.

[作者简介]



罗文宇（1982- ），男，河南正阳人，博士，华北水利水电大学讲师，主要研究方向为电磁超表面、无线能量传输、可编程无线环境。



刘河潮（1980- ），男，河南平顶山人，博士，华北水利水电大学讲师，主要研究方向为深度强化学习、视频编码、视频传输。