

基于视距概率模型的6G室内无线通信系统性能分析



LoS Probability Model Based Performance Analysis for 6G Indoor Wireless Communication Systems

毛曦晨/MAO Xichen^{1,2}, 王承祥/WANG Chengxiang^{1,2},
杨松江/YANG Songjiang², 黄杰/HUANG Jie^{1,2},
黄晨/HUANG Chen^{1,2}

(1. 东南大学 移动通信全国重点实验室, 中国 南京 210096;

2. 网络通信与安全紫金山实验室, 中国 南京 211111)

(1. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Purple Mountain Laboratory, Nanjing 211111, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202306007

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20231212.1655.010.html>

网络出版日期: 2023-12-13

收稿日期: 2023-10-15

摘要: 工业物联网、大型商超、体育场馆等室内通信场景的重要性在6G无线通信系统中日益显著。研究室内视距(LoS)信号概率模型有利于提升室内通信系统性能分析准确性。针对室内环境,考虑家具、设备等室内阻挡物的任意位置以及任意高度,构建了视距信号概率模型。该模型可以准确刻画不同阻挡物场景下的视距概率。基于视距信号概率模型,推导了信噪比分布,并研究了室内覆盖性能和能量效率。相关研究成果有助于指导室内无线通信系统部署,降低成本。

关键词: 室内无线通信; 视距概率; 覆盖概率; 能量效率; 绿色通信

Abstract: The importance of indoor communication scenarios, such as industrial Internet of things, superstores, and stadiums, is becoming increasingly significant in the sixth generation (6G) wireless communication systems. The investigation into indoor line-of-sight (LoS) signal probability is conducive to improving the accuracy of indoor communication performance analysis. In this paper, a LoS probability model is constructed for indoor environments, considering any position and any height of blockages. This model can accurately characterize the LoS probability in different scenarios. Based on the model, this paper derives the signal-to-noise ratio (SNR) distribution and investigates the coverage performance and energy efficiency. The research results are instrumental in instructing the deployment of indoor wireless systems and reducing costs.

Keywords: indoor wireless communication; LoS probability; coverage probability; energy efficiency; green communication

引用格式: 毛曦晨, 王承祥, 杨松江, 等. 基于视距概率模型的6G室内无线通信系统性能分析[J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(6): 39-45. DOI: 10.12142/ZTETJ.202306007

Citation: MAO X C, WANG C X, YANG S J, et al. LoS probability model based performance analysis for 6G indoor wireless communication systems [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(6): 39-45. DOI: 10.12142/ZTETJ.202306007

随着城市居民密度的不断增加,室内通信场景逐渐成为移动通信的重要场景,工业物联网、大型商超等场景下的通信覆盖需求日益提升。中国联通在2019年发布白皮书《中国联通5G数字化室分技术白皮书》^[1],预测室内流量将达到总体流量的80%以上。随着室内用户数量激增、传

输数据速率要求提升,室内通信场景在未来通信系统的重要地位日益突出。全球学者均已开展针对6G的研究。国际电信联盟(ITU)在2023年6月发布了6G愿景建议书^[2],强调室内通信在未来6G应用场景的重要地位,其中海量通信、超高可靠低时延通信等均涉及室内用户。此外,文献[3]和[4]同样阐述了室内通信系统在6G系统中的重要地位,并提出光无线技术、超大规模天线阵列以及智能反射面等使能技术,以提升室内通信性能。

室内通信场景的重要性逐渐凸显,对此全球学者广泛开

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2900300);国家自然科学基金项目(61960206006、62271147);中央高校基本科研业务费(2242022K60006、2242023K5003);江苏省重点研发计划项目(BE2022067、BE2022067-1);江苏省双创博士项目(JSJCS20210082);欧盟H2020 RISE TESTBED2项目(872172);东南大学启动研究基金项目(RF1028623029)

展针对室内通信性能的研究。文献[5]研究室内覆盖概率模型，并推导信干噪比分布，但该模型仅考虑了视距 (LoS) 信号，未考虑遮挡效应和视距信号概率。文献[6]针对室内覆盖性能及能效提升，研究室内通信系统的优化问题，但在模型中同样未考虑视距概率模型的影响。文献[7]推导了用户与接入点的距离概率分布，并分析覆盖概率，但仍忽视了视距概率对于覆盖性能的影响。然而，视距概率模型是准确分析室内通信系统性能的重要基础。第3代合作伙伴计划 (3GPP) 在标准文档中给出基础视距概率模型^[8]，使用指数函数表征视距概率与距离关系。文献[9]研究室内系统的干扰以及覆盖性能，同样直接采用指数函数表征视距概率。文献[10]和[11]研究智能反射面协助下的室外到室内系统性能，由于所考虑的室内传播场景较为简单，因此同样使用指数函数来表征视距概率。指数函数表征视距概率仅适用于较简单的室内场景。一旦考虑家具、设备、墙壁等阻挡物，指数函数将不再适用于室内视距概率分析。因此，一些研究已开展视距概率模型研究。文献[12]基于视距概率研究服务质量概率，但其模型中未考虑不同类型阻挡物的影响。此外，文献[13]和[14]研究了三维室内视距概率，但仍只考虑墙壁阻挡物的影响，忽视了其他类型阻挡物对于视距概率的影响。

综上，室内无线通信性能研究已广泛开展，但仍面临一些挑战：首先，现有性能分析研究忽略了视距概率模型的重要性，或单纯采用3GPP标准视距概率模型；其次，研究室内通信性能时，通信阻挡物考虑得较简单，未考虑阻挡物的高度等因素的影响。为弥补上述不足，本文开展了视距概率模型研究工作，并基于视距概率模型研究室内通信系统性能。本文的主要贡献如下：

- 1) 考虑除墙壁阻挡以外，场景中不同高度的阻挡物对信号传播的影响，为工业物联网、大型商超等场景的视距概率模型推导提供参考；
- 2) 构建适用于工业物联网、大型商超等6G场景的视距概率模型，该模型可以准确刻画不同阻挡物场景下的视距概率，并且考虑了基站位置、用户位置、基站数量等因素的影响；
- 3) 基于提出的视距概率模型和6G普适信道模型，研究了路径损耗、覆盖概率以及能效，总结分析室内无线通信性能主要特点，指导室内通信性能优化方案。

1 室内视距概率模型

1.1 室内通信场景

室内通信相较于室外通信，场景特征显著。首先，室内

通信的用户密度较高，且用户活动范围集中在固定区域。其次，室内传播阻挡物较为复杂，但阻挡物特征具有趋同性，例如：在工业物联网中，传播阻挡物多为大型生产设备，其形状、位置受到厂房设计和生产线限制，往往同区域阻挡物为同类型设备^[14]。最后，室内通信信号传播场景较为固定，且一般具有各向同性的特征^[13]。由于室内通信场景中阻挡物具有趋同性特征，因此在对室内通信场景建模时无须特别区分信号传播方向，可以认为其信号传播特性具有各向同性，仅受到阻挡物的影响。受文献[15]和[16]启发，本文归纳总结室内场景特征，将其建模为二维 (2D) 场景。具体场景如图1所示。

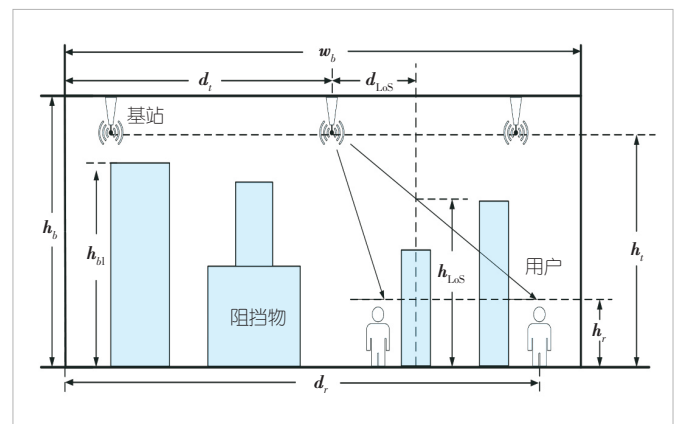
图1中 h_b 和 w_b 分别表示为房间的高度和最长直线传播距离。房间部署 N 个基站，基站为同源基站且均部署在天花板上，基站间信号互无干扰。 d_i 表示基站距离房间边缘的距离， d_r 表示用户距离房间边缘的距离。 h_t 和 h_r 分别表示基站和用户的离地高度。基站端配备了 N_T 根天线，用户端配备了 N_R 根天线。 h_{bl} 表示阻挡物的高度。假设在信号由某一基站向用户传播过程中，视距信号将经过 N_{bl} 个阻挡物。 d_{LoS} 表示信号传播途中障碍物距基站的距离。 h_{LoS} 表示视距信号在障碍处的高度。

1.2 室内视距概率模型

文献[17]认为计算视距概率应基于传播过程阻挡物遮挡信号的概率。考虑室内空间具有有限性，且室内阻挡物往往相对固定，本文建立的视距概率模型如下。

如室内场景描述，对于第 i 个基站向用户传输信号过程中，信号将经过 N_{bl} 个阻挡物，因此对于该信号来说，其视距概率为：

$$P_{LoS,i} = \prod_{i=1}^{N_{bl}} P\{h_{bl_i} < h_{LoS}\} \quad (1)$$



▲图1 室内通信场景模型

即所有阻挡物均低于视距信号高度的概率。对于阻挡物处视距信号高度，可通过下式计算获得：

$$h_{\text{LoS}} = h_t - d_{\text{LoS}} \frac{|h_t - h_r|}{|d_t - d_r|} \quad (2)$$

考虑室内场景中阻挡物多为同类物体，例如办公室场景中的阻挡物为办公桌，大型商场的为货架，工厂的为设备。因此，阻挡物的高度、大小具有规律性，大部分集中在一个较小区间，少量阻挡物具有较高或较低高度。阻挡物高度可认为服从正态分布规律，即 $h_{bl} \sim N(\mu, \sigma^2)$ ， μ 和 σ^2 分别表示阻挡物高度的均值和方差。其概率分布函数为

$$f(h_{bl}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(h_{bl} - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

因此，对于第 i 个基站来说，视距信号概率为

$$P_{\text{LoS}, i} = \prod_{i=1}^{N_b} \int_0^{h_{\text{LoS}}} f(h_{bl}) dh_b = \prod_{i=1}^{N_b} 0.5 \times \left[\text{erf}\left(\frac{h_{\text{LoS}} - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right) - \text{erf}\left(-\frac{\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right] \quad (4)$$

由于室内场景部署了 N 个基站，因此对于每一个基站来说，其视距概率均如公式 (4) 所示，因此室内通信系统的总体视距概率为

$$P_{\text{LoS}} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{\text{LoS}, i}) = 1 - \prod_{i=1}^N \left(1 - \prod_{i=1}^{N_b} 0.5 \times \left[\text{erf}\left(\frac{h_{\text{LoS}} - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right) - \text{erf}\left(-\frac{\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right] \right) \quad (5)$$

非视距概率为：

$$P_{\text{NLoS}} = 1 - P_{\text{LoS}} = \prod_{i=1}^N (1 - P_{\text{LoS}, i}) \quad (6)$$

2 室内无线通信性能分析

2.1 信道模型

1) 路径损耗

本文采用 3GPP TR 38.901 标准文档中大规模室内场景的路径损耗公式。

$$PL_{\text{LoS}} = 32.4 + 17.3\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f_c) \quad (7)$$

$$PL_{\text{NLoS}} = 32.4 + 31.9\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f_c) \quad (8)$$

其中， PL_{LoS} 为视距信号路径损耗， PL_{NLoS} 为非视距信号路径损耗， d 为用户与基站之间的传播距离，即 $d = \sqrt{(h_t - h_r)^2 + (d_t - d_r)^2}$ ，单位为 m； f_c 为信号频率，单位为吉比特。

基于提出的视距概率模型，对于用户，平均路径损耗为：

$$\Lambda(h_r, d_r) = P_{\text{LoS}} PL_{\text{LoS}} + P_{\text{NLoS}} PL_{\text{NLoS}} \quad (9)$$

路径损耗取决于用户所处的位置。

2) 小尺度信道模型

由于室内阻挡物分布极为密集，因此小尺度特性对于信号传播影响较大。文献[18]提出了 6G 普适几何随机信道模型，该模型可以较好地模拟真实室内信道环境。本文基于 6G 普适信道模型，结合室内通信场景进行必要简化。小尺度信道模型表达式如公式 (10) — (12) 所示。

$$h_{qp}(\tau) = \sqrt{\frac{K}{K+1}} h_{\varphi}^{\text{LoS}}(\tau) + \sqrt{\frac{1}{K+1}} h_{\varphi}^{\text{NLoS}}(\tau) \quad (10)$$

$$h_{\varphi}^{\text{LoS}}(\tau) = \begin{bmatrix} e^{j\theta_{\varphi}^{\text{LoS}}} & 0 \\ 0 & e^{j\theta_{\varphi}^{\text{LoS}}} \end{bmatrix} e^{j2\pi f_c \tau} \delta(\tau - \tau_{qp}) \quad (11)$$

$$h_{\varphi}^{\text{NLoS}}(\tau) = \sum_{n=1}^{N_{\varphi}} \sum_{m=1}^{N_{\varphi}} \begin{bmatrix} e^{j\theta_{\varphi}^{\text{NLoS}}} & \sqrt{\mu\kappa^{-1}} e^{j\theta_{\varphi}^{\text{NLoS}}} \\ \sqrt{\kappa^{-1}} e^{j\theta_{\varphi}^{\text{NLoS}}} & \sqrt{\mu} e^{j\theta_{\varphi}^{\text{NLoS}}} \end{bmatrix} \sqrt{P_{qp, mn}} e^{j2\pi f_c \tau} \delta(\tau - \tau_{qp, mn}) \quad (12)$$

其中， K 为莱斯因子，由于其表征视距信号分量的占比，本文中 K 由视距概率代替。 θ_L^{VV} 、 θ_L^{HH} 、 θ_{mn}^{VV} 、 θ_{mn}^{HH} 、 θ_{mn}^{HV} 、 θ_{mn}^{VH} 为随机相位， $\tau_{qp, mn}$ 为多径信号时延， $P_{qp, mn}$ 为信号功率， μ 为共极性不平衡， κ 为交叉极化功率比， f_c 为载波频率。因此小尺度信道矩阵为：

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11}(\tau) & \cdots & h_{1N_r}(\tau) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_t}(\tau) & \cdots & h_{N_t N_r}(\tau) \end{bmatrix} \quad (13)$$

2.2 覆盖概率

覆盖概率是衡量系统通信性能的重要指标，可以有效评估系统基站部署的有效性。一般用信噪比 (SNR) 来衡量覆盖概率，即当该位置的 SNR 超过设定阈值时，则认为该位置已被覆盖。

$$P_c = \text{Probability}\{\text{SNR} \geq \text{SNR}_{th}\} \quad (14)$$

对于某一位置的用户来说，考虑路径损耗以及小尺度衰落等特性，其接收到的SNR为：

$$\text{SNR}(h_r, d_r) = \frac{|H|^2 P_s}{\Lambda(h_r, d_r) P_n}, \quad (15)$$

其中， P_s 代表信号发射功率， P_n 表示噪声功率。SNR取决于用户所处位置。因此覆盖概率为：

$$P_c = \frac{\sum (h_{r_i, \max} - h_{r_i, \min})(d_{r_i, \max} - d_{r_i, \min})}{(h_{r, \max} - h_{r, \min})(d_{r, \max} - d_{r, \min})}, \quad (16)$$

其中， $h_{\max/\min}$ 表示用户的最高和最低高度， $d_{\max/\min}$ 表示用户活动的最大和最小位置范围。可覆盖区域用 ϑ 表示。

2.3 能量效率

能量效率（EE）是指每焦耳能量可传输的数据数量。随着通信系统能耗的日益上涨，EE逐渐成为一个重要的性能指标^[1,3]。

基于公式（15）可得到系统平均SNR：

$$\text{SNR} = \mathbb{E} \left[\frac{|h_{qp}|^2 P_s}{\Lambda(h_r, d_r) P_n} \right], (h_r, d_r) \in \vartheta. \quad (17)$$

因此，系统能效为：

$$\text{EE} = \frac{\sum_{q=1, p=1}^{N_r, N_t} B \log_2(1 + \text{SNR})}{\text{Power}}, \quad (18)$$

其中， B 表示系统带宽，Power为室内通信系统功耗。系统功耗采用文献[19]功耗模型，主要包含射频功耗、基带功耗、功率放大器功耗等功耗。

3 仿真结果分析

本节将分析提出的视距概率模型以及相应的仿真结果，并且分析不同基站部署下的系统性能。

3.1 仿真参数设置

本小节将总结仿真参数设置，后续如无特殊说明，则仿真参数依照本小节设置。

1) 尺寸设置

考虑工业物联网、大型商超、办公室等场景，本文设置室内最长传播距离为100 m，高度为6 m。假设基站的高度为6 m，基站间距离为等间隔距离。此外，由于室内接收端多为手机、电脑以及工业自动化设备，因此接收端高度在同

一场景下可默认为相同高度。本文设置接收端高度为1.5 m。

2) 收发端设置

根据文献[1]，5G时代室内微基站的单通道发射功率大于250 mW。250 mW、400 mW以及500 mW是常见的发射功率参数。因此本文中我们选择400 mW/每通道作为信号发射功率。设定发射端天线数为128，接收端天线数为4。

3.2 视距概率模型

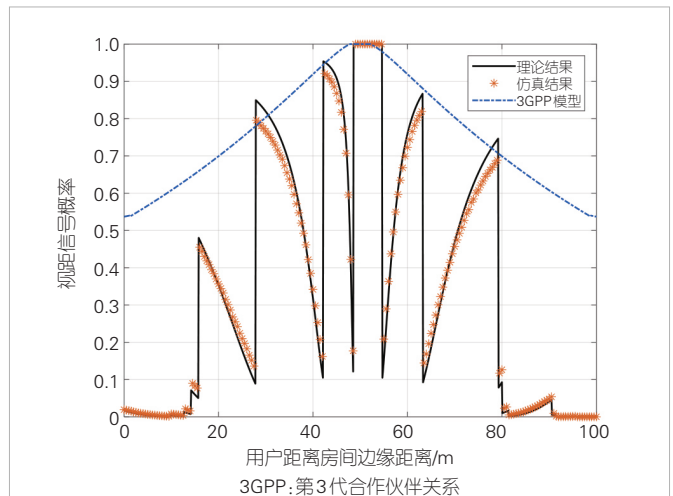
大多室内性能研究直接采用文献[8]中模型，其表达式为：

$$P_{\text{LoS}} = \begin{cases} 1 & , d \leq 5 \text{ m} \\ \exp\left(-\frac{d-5}{70.8}\right) & , 5\text{ m} < d \leq 49 \text{ m} \\ \exp\left(-\frac{d-49}{211.7}\right) \times 0.54 & , 49\text{ m} < d \end{cases}. \quad (19)$$

在公式（19）的视距概率所依据的场景模型中，基站分布为等间隔分布，且未考虑复杂阻挡物环境。本小节将对比较模型与本文提出的模型在复杂室内传播环境下的准确性。

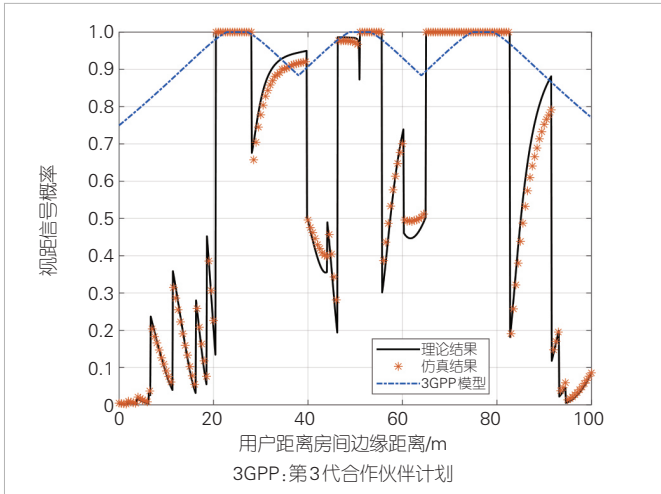
图2和图3分别展示了室内部署1个基站和部署3个基站的视距概率模型，并且对比了本文提出的视距概率模型与3GPP概率模型。从图中可以看出，3GPP模型可以基本刻画视距概率的变化趋势，但是由于室内阻挡物的原因，该模型在多数情况下高估了视距概率。本文所提出的视距概率模型在各种情况下均能较好地贴合场景仿真结果。使用本文模型能够更准确地分析室内通信系统性能。

图4和图5分别展示了在1个基站下视距概率与路径损耗、SNR的关系。从图中可以看出，随着视距概率减小，路径损耗增高，SNR降低。由于室内传播环境复杂，因此当基

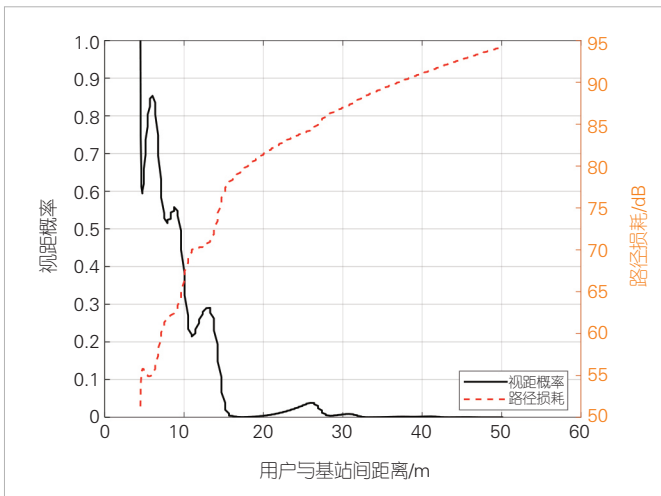


▲图2 1个基站下室内视距概率

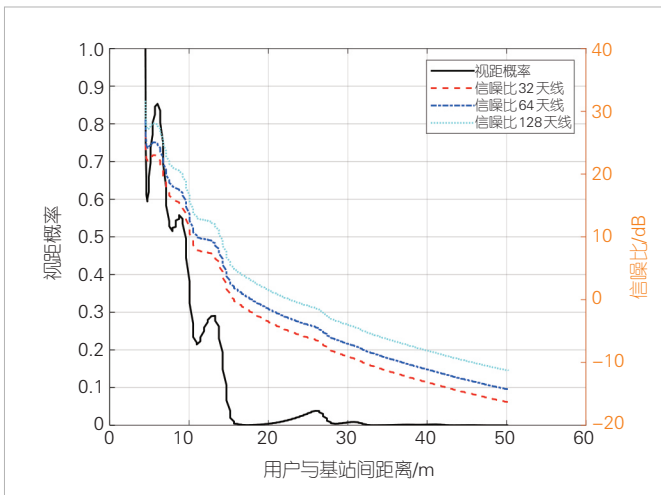
站与用户间距离超过 30 m 时，基本不存在视距信号分量，路径传播损耗已超过 85 dB 且信噪比低于 -5 dB。此时，接收



▲图3 3个基站下室内视距概率



▲图4 视距概率与路径损耗的关系



▲图5 视距概率与信噪比的关系

信号质量差，难以维持正常通信。图5同时研究了不同发射端天线数情况下的SNR。可以发现，当天线数增加时，SNR有明显提升。因此，6G时代室内系统应用超大规模天线阵列将有助于提升系统性能。

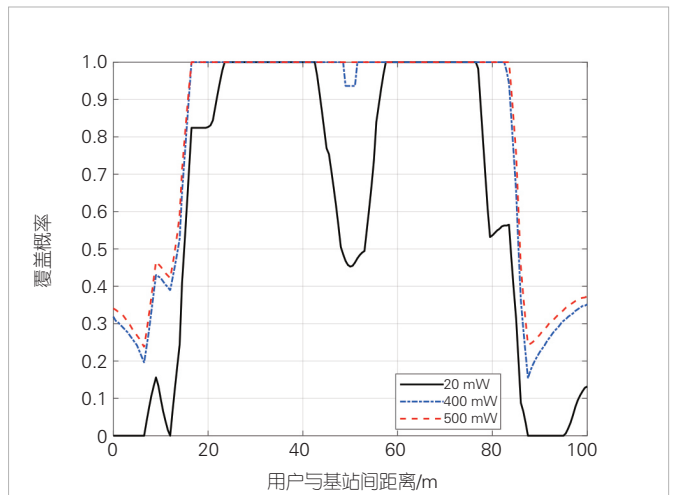
3.3 室内无线通信性能

图6展示了不同发射功率下的覆盖概率，此时室内部署2个基站。可以看出，增加信号发射功率可有效提高信号覆盖概率。但是由于遮挡效应，一味提升信号功率并不一定能够提升覆盖概率。例如，在房间边缘位置，400 mW 与 500 mW 的覆盖概率近似。原因在于：障碍物形成覆盖死角，提升发射功率仅能缓解覆盖问题。因此，适当降低发射功率，可以获得近似的通信性能并且能降低成本。此外，优化建筑布局设计和基站部署、减少死角，都是提升性能的思路。

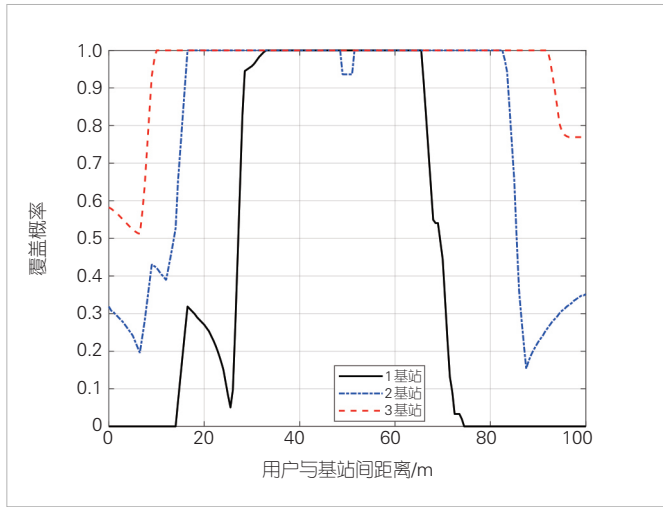
图7和图8分别展示了室内部署不同基站数下的覆盖概率和能量效率。图7说明增加基站数量可以有效改善覆盖概率。从图8中可以看出，当用户距离基站较近时，3基站的能效较高，原因在于用户可选择多个基站提升信号质量。然而，当距离增加时，2基站的能效较高，原因在于3基站中必然有1~2个基站无法服务该用户。图7和图8说明系统可在覆盖概率与能效中取得最优性能。

4 结论

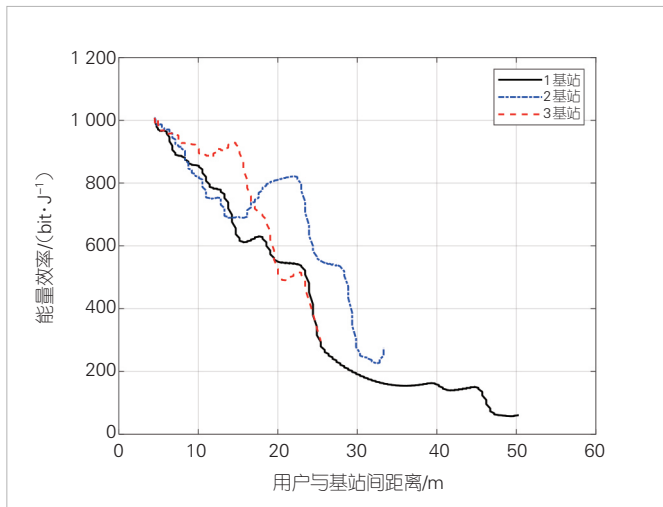
针对具有复杂传播环境的室内通信场景，本文提出了一种考虑障碍物高度的视距概率模型。该模型相较于3GPP视距概率模型可以更为准确地分析工业物联网、大型办公室、大型商场等6G室内场景视距概率。此外，本文基于6G普适信道模型，研究路径损耗、覆盖概率、能效等性能。结果证



▲图6 不同发射功率下的覆盖概率



▲图7 不同基站数量下的覆盖概率



▲图8 不同基站数量下的能量效率

明，视距概率伴随与基站间的距离的增加而降低，但由于障碍物存在，视距概率存在起伏。当用户与基站距离超过30 m时，几乎不存在视距信号，且信号质量较差。一味提升基站密度与信号功率可以提升覆盖概率，但效果并不显著，反而会降低系统能效。优化基站部署以及建筑室内布局同样是提升系统性能的可行方法。

参考文献

[1] 中国联通. 中国联通5G数字化室分技术白皮书 [R]. 2019
 [2] ITU. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond: ITU-R 1-8 [S]. 2023
 [3] WANG C X, YOU X H, GAO X Q, et al. On the road to 6G: visions, requirements, key technologies, and testbeds [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2023, 25(2): 905-974. DOI: 10.1109/COMST.2023.3249835
 [4] YOU X H, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts [J]. Science China information sciences, 2021, 64(1): 110301. DOI: 10.1007/s11432-020-2955-6

[5] YIN L, HAAS H. Coverage analysis of multiuser visible light communication networks [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2018, 17(3): 1630-1643. DOI: 10.1109/TWC.2017.2782694
 [6] ABOAGYE S, IBRAHIM A, NGATCHED T M N, et al. Design of energy efficient hybrid VLC/RF/PLC communication system for indoor networks [J]. IEEE wireless communications letters, 2020, 9(2): 143-147. DOI: 10.1109/LWC.2019.2946144
 [7] LOU Z Y, BELMEKKI B E Y, ALOUINI M S. Coverage analysis of hybrid RF/THz networks with best relay selection [J]. IEEE communications letters, 2023, 27(6): 1634-1638. DOI: 10.1109/LCOMM.2023.3267900
 [8] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz: 3GPP TR 38.901 [S]. 2018
 [9] 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. DOI: 10.1109/TWC.2020.3033825
 [10] LI Z Y, HU H N, ZHANG J L, et al. Coverage analysis of multiple transmissive RIS-aided outdoor-to-indoor mmWave networks [J]. IEEE transactions on broadcasting, 2022, 68(4): 935-942. DOI: 10.1109/TBC.2022.3196169
 [11] NEMATI M, MAHAM B, POKHREL S R, et al. Modeling RIS empowered outdoor-to-indoor communication in mmWave cellular networks [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(11): 7837-7850. DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3104878
 [12] LI J, BAO X, ZHANG W C, et al. QoE probability coverage model of indoor visible light communication network [J]. IEEE access, 2020, 8: 45390-45399. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2977936
 [13] YANG W F, ZHANG J L, GLAZUNOV A A, et al. Line-of-sight probability for channel modeling in 3-D indoor environments [J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2020, 19(7): 1182-1186. DOI: 10.1109/LAWP.2020.2994392
 [14] ZHENG H, ZHANG J L, LI H, et al. Exact line-of-sight probability for channel modeling in typical indoor environments [J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2018, 17(7): 1359-1362. DOI: 10.1109/LAWP.2018.2846748
 [15] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, LARDNER S. Optimal LAP altitude for maximum coverage [J]. IEEE wireless communications letters, 2014, 3(6): 569-572. DOI: 10.1109/LWC.2014.2342736
 [16] YANG S J, ZHANG J L, ZHANG J. Energy efficiency optimization in millimeter-wave air-to-ground links under UAV wobbling [C]// Proceedings of 2022 IEEE 33rd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE, 2022: 572-576. DOI: 10.1109/PIMRC54779.2022.9977967
 [17] ITU. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial broadband radio access systems operating in a frequency range from 3 GHz to 60 GHz: P.1410-6 [S]. 2023
 [18] WANG C X, LV Z, GAO X Q, et al. Pervasive wireless channel modeling theory and applications to 6G GBsMs for all frequency bands and all scenarios [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2022, 71(9): 9159-9173. DOI: 10.1109/TVT.2022.3179695
 [19] FU Y, WANG C X, MAO X C, et al. Spectrum-energy-economy efficiency analysis of B5G wireless communication systems with separated indoor/outdoor scenarios [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2023, early access. DOI: 10.1109/TWC.2023.3273261

作者简介



毛曦晨，东南大学在读博士研究生；主要研究方向为6G无线通信系统性能优化、室内通信系统设计与优化。



王承祥，东南大学首席教授、博士生导师，移动通信全国重点实验室和网络通信与安全紫金山实验室教授，东南大学信息科学与工程学院执行院长，欧洲科学院院士，欧洲科学与艺术院院士，英国爱丁堡皇家学会院士，IEEE Fellow，IET Fellow，中国通信学会会士；主要研究方向为无线信道测量与建模、6G智能网络架构与关键技术、电磁信息论。



杨松江，网络通信与安全紫金山实验室博士后；主要研究方向为毫米波信道建模、无人机空对地信道模型、射线追踪信道建模方法、频谱效率分析和能源效率分析。



黄杰，东南大学移动通信全国重点实验室副研究员、网络通信与安全紫金山实验室科研人员；主要研究方向为毫米波、太赫兹、超大规模天线、智能反射面信道测量与建模、电磁信息论、6G无线通信关键技术。



黄晨，网络通信与安全紫金山实验室研究员、东南大学校外导师、江苏省卓越博士后、中国通信学会高级会员、中兴通讯“促进产学研合作青年专家委员会”委员，入选中国科协青年人才托举工程；主要研究方向为6G智能无线通信、基于人工智能的无线信道特性分析与建模研究。

综合信息

《中兴通讯技术》2024年专题计划

期次	专题名称	策划人
1	下一代多址技术	北京交通大学教授 艾渤 北京交通大学教授 陈为
2	网络大模型	中国电信IP领域首席专家 唐宏 中兴通讯无线首席架构师 熊先奎
3	6G多天线技术	东南大学首席教授 金石 北京交通大学教授 章嘉懿 东南大学副研究员 韩瑜
4	6G无线系统技术	中国信息通信研究院副院长 王志勤 中国移动研究院院长 黄宇红 东南大学教授 王东明
5	卫星通信技术	哈尔滨工业大学(深圳)教授 张钦宇
6	数据通信新技术	中国电信研究院教授级高工 解冲锋 中国联通研究院副院长 唐雄燕