H.Poddar、T. Yoshimura、M. Pagin、T. S. Rappaport、A. Ishii 和 M. Zorzi，《ns-3 亚太赫兹和毫米波基于位置抽样的纽约大学信道模型（NYUSIM）的实现》发表于 *2023*年*ns-3*研讨会（*WNS3 2023*），美国弗吉尼亚州阿灵顿，2023年6月28日至29日。

ns-3 亚太赫兹和毫米波基于位置抽样的纽约大学信道模型（NYUSIM）的实现

Hitesh Poddar 纽约大学无线研究中心，纽约大学，美国纽约
hiteshp@nyu.edu

Tomoki Yoshimura 夏普公司，美国华盛顿
yoshi
murat@sharplabs.com

Matteo Pagin 帕多瓦大学，意大利帕多瓦
pagin
matte@dei.unipd.it

Theodore S. Rappaport 纽约大学无线研究中心，纽约大学，美国纽约
tsr@nyu.edu

Art Ishii 夏普公司
华盛顿州，美国
is
hiia@sharplabs.com

Michele Zorzi 帕多瓦大学 帕多瓦，意大利
zorzi@dei.unipd.it

arXiv:2305.01828v1 [cs.IT] 2 May 2023

摘要

下一代无线网络将结合使用亚太赫兹频率和毫米波频率，以支持多Gbps和低时延应用。为了满足不同垂直行业和使用场景的需求，工程师必须采取整体性方法，构建、分析和研究网络的不同部分，以及协议栈较低层与较高层之间的相互作用。对于城市微蜂窝（UMi）、城市宏蜂窝（UMa）、农村宏蜂窝（RMa）、室内热点（InH）和室内工厂（InF）等不同场景，准确刻画涵盖广泛频率范围的无线电传播特性至关重要。3GPP统计信道模型（SCM）过于简化，且仅适用于0.5–100 GHz的频率范围。因此，为克服这些局限，本文针对0.5–150 GHz的频率范围，实现了适用于UMi、UMa、RMa、InH和InF场景的详细的基于抽样点的纽约大学信道模型（NYUSIM）。NYUSIM使研究人员能够在ns-3中为未来的亚太赫兹无线网络设计和评估新的算法与协议。

CCS 概念

• **网络** → 网络仿真；移动网络；。

关键词

3GPP、5G、6G、B5G、信道模型、系统仿真、亚太赫兹

ACM 参考格式：

Hitesh Poddar、Tomoki Yoshimura、Matteo Pagin、Theodore S. Rappaport、Art Ishii 和 Michele Zorzi。2023。亚太赫兹和毫米波基于位置抽样的 NYU 信道模型（NYUSIM）的 ns-3 实现。发表于*2023*年*ns-3*研讨会（*WNS3 2023*），*2023*年*6*月*28*日至*29*日，美国弗吉尼亚州阿灵顿。ACM，美国纽约州纽约，9页。https://doi.org/10.1145/3592149.3592155

允许出于个人或课堂用途免费制作本作品全部或部分内容的数字或纸质副本，但不得为营利或商业利益复制或分发，且副本首页必须保留本声明和完整引文。对于本作品中由作者以外的其他方拥有版权的部分，必须尊重其版权。注明出处后可以摘录。若要以其他方式复制、重新发布、发布到服务器或分发至列表，须事先获得具体许可和/或支付费用。请通过 permissions@acm.org 申请许可。*WNS3 2023, 2023*年*6*月*28*日至*29*日，美国弗吉尼亚州阿灵顿© 2023 版权归所有者/作者所有。出版权已授权给 ACM。
ACM ISBN 979-8-4007-0747-6/23/06...$15.00
https://doi.org/10.1145/3592149.3592155

1 引言

对更高容量、多Gbps数据速率以及低于1毫秒时延的需求日益增长，促使无线产业探索高于毫米波的频率 [5, 30]。美国联邦通信委员会（FCC）工程技术办公室于2019年发布的ET-案卷18-21，为95 GHz至3 THz的频段提供实验许可证，以鼓励开发面向数据密集型和高带宽应用的新型无线技术 [2]。全球标准化组织和研究人员已开始探索以140 GHz为中心的D波段（130–175 GHz），将其视为未来无线网络的有前景频段 [19, 37]。随着软件定义网络等新技术的发展，多用户通信网络变得过于复杂，传统分析方法难以提供关于网络性能的有效见解和认识。因此，研究人员依赖ns-3等详细的网络仿真器和蒙特卡罗仿真 [36, 41], ，以了解端到端的整体跨层网络行为。仿真为复杂无线网络的设计及性能评估提供了快速、便捷、高效且准确的方法。ns-3中的毫米波[17] 和新空口（NR） [21] 模块用于对5G无线网络进行全栈端到端仿真。网络性能在一定程度上取决于对多个下一代节点B（gNB）与用户设备（UE）之间无线信道的建模准确度。早期研究表明，基于测量的统计信道脉冲响应（CIR）模型（SIRCIM） [27]可用于更准确的跨层端到端误码率（BER）仿真（BERSIM） [3, 25]，因为研究发现，误码率不仅取决于传播信道的均方根（RMS）时延扩展，也取决于多径分量的时间和空间分布。因此，必须采用能够在宽频率范围及各种传播场景 [29, 31] 下忠实再现现实世界无线信道的信道模型，来评估和分析无线网络的性能。

目前，ns-3 使用 3GPP TR 38.901 SCM [1, 43] 对所有3GPP列出的场景（UMi、UMa、RMa、InH 和 InF）中 0.5–100 GHz 频率范围内的无线信道进行建模。文献 [29] 表明，3GPP SCM 对室外场景中的实际无线信道进行了过度简化。此外，3GPP SCM 有限的频率范围使研究人员无法研究 100 GHz 以上的未来网络 [30]。此外，我们还需要进一步了解无线信道模型

对整体网络性能的影响 [22, 29, 36]，因为 ns-3 用户只能使用 3GPP SCM。为使研究界能够基于真实信道测量模型探索和分析未来网络，并覆盖 3GPP列出的场景中 0.5–150 GHz 的频率范围，我们介绍了在 ns-3 中实现基于位置抽样的 NYUSIM。ns-3 中的 NYUSIM 实现依托于基于 MATLAB 的开源毫米波和亚太赫兹信道仿真器 *NYUSIM*。该仿真器由 NYU WIRELESS 于 2016年开发。多届研究生为 *NYUSIM* 提供了支持；该软件在全球无线产业和学术界的下载量已超过 10 万次 [6, 8, 38]，并被广泛用作 3GPP SCM 的替代方案。*NYUSIM* 基于在纽约市和弗吉尼亚州农村地区开展的大量现场测量开发；2011至2022年期间，针对所有 3GPP列出的场景，在 28至 1401 GHz 频段共收集了超过 2 TB 的测量数据 [7, 9–11, 13, 15, 16, 26, 28, 33, 34, 39, 40]。

本文其余部分安排如下：第 2 节介绍 ns-3 中基于位置抽样的 NYUSIM 的实现细节，并为 NYUSIM 提供类似 3GPP 的信道生成流程。第 3 节列举了在 ns-3 中使用 NYUSIM 的示例。最后，第 4 节总结本文并展望未来的研究方向。

2 NYUSIM 在 ns-3 中的实现

在用户设备（UE）于某个环境中移动时，可以通过多种方式对多用户 UE 性能进行建模。有些方法涉及在局部区域内移动（小尺度信道变化），有些方法关注点位置，并考虑用户被抽样放置的距离范围内的大尺度信道效应（基于位置抽样），还有一些模型则考虑信道沿轨迹或在极小区域内的变化（空间一致性）。基于 MATLAB 的 *NYUSIM* 可模拟基于位置抽样和基于空间一致性的信道仿真，并支持人体遮挡 [6, 8, 38] 3 。然而，包含多个 UE 和 gNB，且每个设备都具有详细协议栈的 ns-3 系统级仿真，计算开销很大。因此，为简化仿真并提高计算效率，我们在 ns-3 中实现了不含人体遮挡的基于位置抽样的*NYUSIM* [20]。

在 ns-3 中，无线信道通过传播模块和 Spectrum模块 [43] 进行建模。传播模块定义了传播损耗模型接口，并可进一步扩展，以纳入不同的传播模型来描述大尺度衰落。另一方面，Spectrum模块定义了 SpectrumPropagationLossModel 接口。Spectrum模块使用功率谱密度（PSD）对无线信道的小尺度衰落进行建模，即快衰落和频率选择性衰落。ns-3 中 NYUSIM 的实现沿用了 3GPP SCM [43] 的实现方式，以便复用 ns-3 中 3GPP SCM 的模块，尽量减少所需的代码改动。图 1 展示了用于在 ns-3 中实现 NYUSIM 的各个类及其关系的简化统一建模语言（UML）图。从图 1 可以看出，NYUSIM 的实现由三个主要组件构成：(i) NYUChannelConditionModel，用于确定 LOS/NLOS信道条件；(ii) NYUPropagationLossModel，用于建模大尺度衰落，即路径损耗和阴影效应；以及 (iii) NYUSpectrumPropagationLossModel，用于计算小尺度衰落，即快衰落和频率选择性衰落。另外请注意，我们在 ns-3 中为 NYUSIM 复用了 ThreeGppAntennaArrayModel [32]。

[1]无线信道传播测量是在 142 GHz 频率下进行的。不过，为了简便起见，我们将这一频率统称为 140 GHz。

2.1 LOS概率模型

视距概率模型用于通过统计方法确定设备与 gNB 之间是否处于视距或非视距状态。NYUSIM 视距概率模型取决于 Tx–Rx 之间的二维间距，且与频率无关，因为它仅基于环境或场景的几何结构和布局，而在毫米波和亚太赫兹频段，衍射可在很大程度上忽略 [30, 31, 35]。为 UE 生成信道模型的第一步是确定信道条件为视距还是非视距。我们扩展了 [43] 中开发的信道条件类，新增了五个不同的类，分别为 NYURmaChannelConditionModel、NYUUma-ChannelConditionModel、NYUUmiChannelConditionModel、NYU-InHChannelConditionModel 和 NYUInFChannelConditionMod-el，每个类负责 NYUSIM 中的不同场景。上述所有新引入的 NYUSIM 类均派生自同一个基类 NYUChannelCondition，该基类扩展了 ChannelConditionModel 接口。NYUSIM 的室外场景视距概率模型基于在纽约市 28 和 73 GHz 频率下进行的无线传播测量开发 [35]。Tx-Rx 位置选自测量数据，并采用射线追踪确定 Tx 与 Rx 之间的路径是否处于视距或非视距状态 [35]。对于 UMi 和 UMa 场景，与 NYUSIM 相比，3GPP SCM 在较远距离（数百米）下预测视距信道条件的概率更高 [29]。然而，在现实世界的 UMi 和 UMa 场景中，要实现数百米的视距传播非常困难 [29, 35]。因此，分别在 NYUUmiChannelConditionModel 和 NYU-UmaChannelConditionModel 中实现的 UMi 和 UMa 视距概率模型，采用基于 [31, 35] 中表 1 和表 2 的 NYU（二次）模型，其表达式分别见式 (1) 和式 (2)。

$$\mathrm{P_{LOS}}(d_{2D}) = (\min(d_1/d_{2D}, 1)(1-\exp(-d_{2D}/d_2)) + \exp(-d_{2D}/d_2))^2, \quad (1)$$

$$\mathrm{P_{LOS}}(d_{2D}) = ((\min(d_1/d_{2D}, 1)(1-\exp(-d_{2D}/d_2)) + \exp(-d_{2D}/d_2))(1+C(d_{2D}, h_{UE})))^2. \quad (2)$$

在（1）中，$d_1 = 22$m、$d_2 = 100$m；在（2）中，$d_1 = 20$m、$d_2 = 160$ m；C在 [1] 的表7.4.2中定义，h_{UE}是UE的高度，单位为米。对于（1）和（2），d_1、d_2 的值均基于测量数据 [35]，而 d_{2D} 是Tx与Rx之间的二维间距，单位为米。然而，NYUSIM中不存在适用于室内热点、农村宏蜂窝和室内工厂场景的视距概率模型。对于NYUInHChannelConditionModel中的室内热点视距概率模型，我们采用表 3 [31] 中的5GCM模型，因为适用于城市微蜂窝和城市宏蜂窝场景的NYU（二次）模型与5GCM视距概率模型相似，而且5GCM采用了与NYUSIM类似的曲线拟合方法来建立视距概率模型。相比之下，对于NYURmaChannelConditionModel中的农村宏蜂窝场景，我们采用3GPP在表7.4.2 [1] 中给出的视距概率模型，因为5GCM

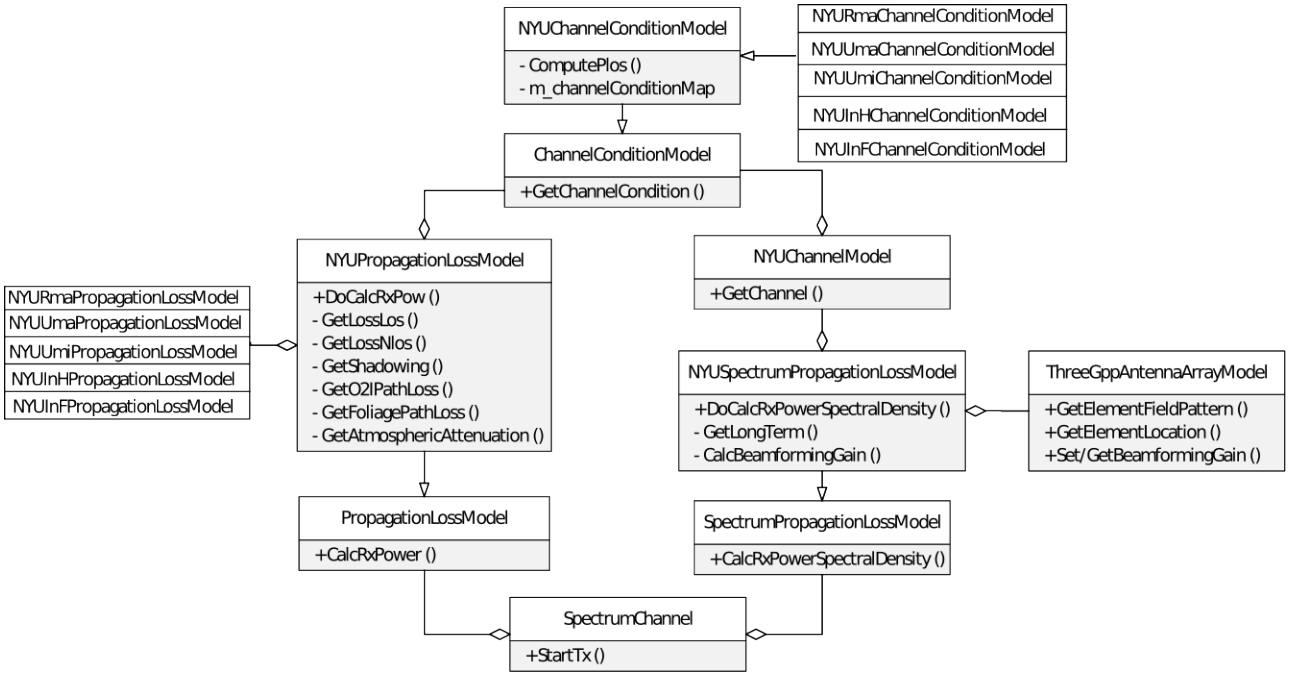


图 1： NYUSIM 在 ns-3 中实现的简化统一建模语言（UML）图

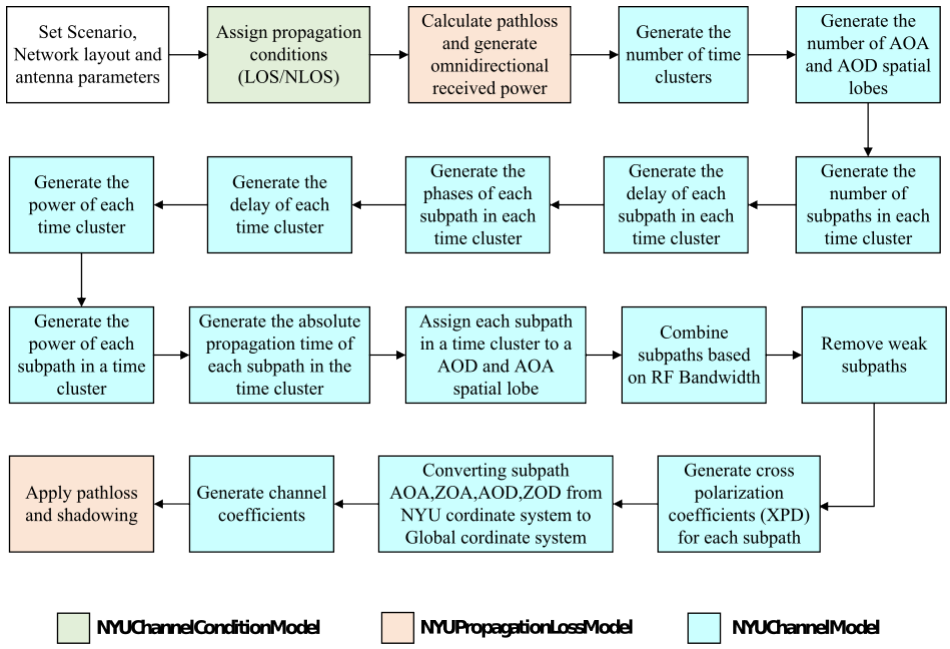


图 2：信道生成 流程；颜色表示各步骤所执行的类

不支持农村宏蜂窝场景的视距概率模型。

NYUInFChannelConditionModel采用一种方法，对

3 7 4 2 GPP在表……中[1] 5 提供的InF-SL、InF-DL、InF-SH和InF-DH场景的视距概率模型取平均值。这是因为GCM不支持视距概率

InF场景的模型，而NYUSIM不会像3GPP [1]中规定的那样，根据尺寸、杂波密度和杂波高度将工厂环境划分为InF-SL、InF-DL、InF-SH和InF-DH等子场景。因此，采用视距概率模型的平均值作为InF场景的一般表示。

在NYUInFChannelConditionModel中。本节提及的所有方法均在文件nyu-cha- nnel-condition-model.cc中实现。

2.2 大尺度路径损耗模型

发射机的距离是使用大尺度路径损耗模型来表征接收功率的依据 [23]。大尺度模型参数（路径损耗和阴影效应）指的是无线信道中随时间和空间缓慢变化的特性 [23]。对于除农村宏蜂窝场景以外的所有场景，NYUSIM 使用近距离自由空间参考距离路径损耗模型（CI），并将 1 m 作为参考距离；研究发现，该模型在许多不同场景中具有更高的准确性，且对测量活动中误差的敏感性较低 [40]。在我们的 ns-3 NYUSIM 实现中，加入大气衰减（AT） [12], 、室外到室内损耗（O2I） [6]和树叶损耗（FL） [22, 24] 等额外衰减项后的 CI 路径损耗模型表达式 [14, 15, 26, 40] 如下式（3）所示:

$$\begin{aligned} \mathrm{PL}^{\mathrm{CI}}(f,d)[\mathrm{dB}] = {} & \mathrm{FSPL}(f,1\ \mathrm{m})[\mathrm{dB}] + 10\eta\log_{10}(d) \\ & + \mathrm{AT}[\mathrm{dB}] + \mathrm{O2I}[\mathrm{dB}] \\ & + \mathrm{FL}[\mathrm{dB}] + \chi_{\sigma}^{CI}[\mathrm{dB}], \end{aligned} \tag{3}$$

其中， f表示以 GHz 为单位的频率， d表示二维 Tx-Rx 间的分离距离， $d \geq 1\,\mathrm{m}$， FSPL(f，1 m)表示在载波频率为 f 时、Tx-Rx 间分离距离为 1 m 的自由空间路径损耗， η表示路径损耗指数（PLE）。O2I 损耗是由于信号从室外环境传播到室内环境而产生的。对于建筑物穿透损耗 [4, 18]， O2I 损耗采用高损耗和低损耗抛物线模型实现。χ_{σ}^{CI}是一个均值为零的高斯随机变量，其标准差为 σ dB，用于表示围绕与距离相关的平均路径损耗值的阴影衰落。

对于农村宏蜂窝场景，为计算大尺度路径损耗，我们采用 CIH 路径损耗模型（具有高度相关路径损耗指数的 CI 模型）。从数学上看，农村宏蜂窝场景中视距和非视距信道条件下的 CIH 路径损耗模型表达式分别如式（4）和式（5）所示。

$$\begin{aligned} \mathrm{PL}^{\mathrm{CIH}}(f,d)[\mathrm{dB}] = {} & \mathrm{FSPL}(f,1m)[\mathrm{dB}] + 23.1\left(1 - 0.03\left(\frac{h_{BS}-35}{35}\right)\right) \\ & \times\log_{10}(d) + \chi_{\sigma}^{CI}[\mathrm{dB}], \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \mathrm{PL}^{\mathrm{CIH}}(f,d)[\mathrm{dB}] = {} & \mathrm{FSPL}(f,1m)[\mathrm{dB}] + 30.7\left(1 - 0.049\left(\frac{h_{BS}-35}{35}\right)\right) \\ & \times\log_{10}(d) + \chi_{\sigma}^{CI}[\mathrm{dB}], \end{aligned} \tag{5}$$

其中， h_{BS}是基站的高度，单位为米；其他项的定义与式（3）类似。

为了实现大尺度模型，我们开发了基类 NYUPropagationLossModel，它扩展了 PropagationLoss- Model 接口。随后，我们开发了四个子类来扩展 NYUPropagationLossModel，即 NYURmaPropagationLossModel、NYUU maPropagationLossModel、NYUUmiPropagationLossModel、NYUInHPropagationLossModel 和 NYUInFPropagationLossMo- del, 分别用于计算农村宏蜂窝、城市宏蜂窝、城市微蜂窝、室内热点和室内工厂场景的路径损耗。上述所有类的实现均位于文件 nyu-propagation-loss- -model.cc 中。我们通过 ChannelConditionModel 接口，将 NYUPropagationLossModel 与信道条件模型配合使用，以模拟路径损耗与视距/非视距条件之间的相互依赖关系。具体而言，DoCalcRxPower 方法通过调用其他方法，根据公式 (3) 计算总路径损耗。首先，DoCalcRxPower 根据场景以及信道处于视距还是非视距状态，调用 GetLossLos 或 GetLossNlos，以计算公式 (3)、(4) 或 (5) 中的各项。η 的取值取决于信道条件（视距/非视距）、场景（城市微蜂窝、城市宏蜂窝、室内热点和室内工厂）以及工作频率；对于农村宏蜂窝场景，则还会考虑 h_{BS}。如果启用了任何附加衰减，DoCalcRxPower 会调用相应的 GetO2IPathLoss、GetFoliageLoss 和 GetAtmosphericAttenuation 方法，分别计算 O2I [dB],FL [dB], 和 AT [dB], 。

如果启用了阴影衰落损耗，我们会在 DoCalcRxPower 中使用 methodGetShadowing 来应用阴影效应模型。另有两个函数，即 GetShadowingStd 和 GetShadowingCorrelation-Distance，供 GetShadowing 使用，以获取阴影衰落分量的标准差（χ_{σ}^{CI}）和阴影效应相关距离。我们使用指数自相关函数对相邻的阴影衰落值进行相关处理。指数自相关取决于两个节点（gNB 和 UE）之间的空间间隔，如 [1] 中所述。

由于 NYUSIM 基于若干不同频段（28、38、73 和 140 GHz）的测量结果，且除室内工厂（InF）场景外，所有场景的测量频率仅为 28 GHz 和 140 GHz（室内工厂测量仅在 142 GHz 进行），因此对于 28 GHz 至 140 GHz 之间的任意频率，必须使用式（6）中的表达式对路径损耗指数（PLE）和 χ_{σ}^{CI} 等参数进行插值:

$$p(f) = \begin{cases} p(28) & , f \leqslant 28, \\ \frac{p(140)-p(28)}{140-28} f + \frac{5p(28)-p(140)}{4} & , 28 < f < 140, \\ p(140) & , f \geqslant 140, \end{cases} \tag{6}$$

其中， $p(f)$表示频率为 fGHz时的PLE或 χ_{σ}^{CI}值， p(28)和 p(140)分别表示28 GHz和140 GHz时的PLE或 χ_{σ}^{CI}值。不同场景和信道条件下28 GHz和140 GHz时的PLE以及 χ_{σ}^{CI}值列于表 1 和表 2 中，这些值是通过对 [9, 13, 15, 16, 28, 42] 在 28 GHz 和140 GHz下的测量数据进行曲线拟合得出的经验值。对于室内工厂场景，我们在整个0.5至150 GHz的频率范围内采用表 2 中的值。此外，在所有3GPP列出的场景中，我们使用 3GPP TR 38.901 [1] 中根据LOS/NLOS信道条件规定的空间相关距离，来计算相关的相邻阴影衰落值。

2.3 NYUSIM小尺度多径模型与信道生成流程

小尺度参数是指无线信道中随时间和空间快速变化的特性 [23]。小尺度多径（MP）模型对于准确模拟无线信道在短距离和短时间内发生的变化是必不可少的，并通过捕获时变无线信道中的多径分量（MPC），帮助在统计意义上重现信道脉冲响应（CIR）。NYUSIM采用时间簇空间波瓣（TCSL）

[33], 中描述的方法，而 3GPP SCM 使用联合时延角度概率密度函数 [1] 来生成信道的时间和空间特征。TCSL 方法源自纽约大学 WIRELESS 在 2011至2022年开展的大量测量活动。时间簇（TC）由时间上彼此接近（几十或几百纳秒）的多径分量组成 [33],，而空间瓣（SL）表示方位角平面或俯仰角平面上大部分能量的到达/离开方向 [33]。我们将信道条件和路径损耗模型与图 2 所述的小尺度特征相结合，使用 NYUSIM 生成信道。以下将详细介绍每个步骤：

- 步骤 ***1***：根据仿真脚本中指定的场景，使用第 2.1 节所述的视距概率模型计算信道条件（视距/非视距）。
- 步骤 ***2***：设置信道条件后，使用 CI 或 CIH 路径损耗模型以及第 2.2 节所述的附加衰减项计算大尺度路径损耗。
- 步骤 ***3***：GetNumberOfTimeClusters 根据表 3—步骤 1 中的分布生成时间簇（TC）的数量。
- 步骤 ***4***：GetNumberOfAoaSpatialLobes 和 GetNumberOf- AodSpatialLobes 分别根据表 3—步骤 8 中的分布生成到达角（AOA）和出发角（AOD）空间波瓣（SL）的数量。例如，1 个 AOA SL 波瓣表示方位角和俯仰角方向各有一个 SL。
- 步骤 ***5***：每个 TC 中多径分量（MP）的数量通过 GetNumberOfSubpathsInTimeCluster，按照表 3 - 步骤 2 中规定的分布生成。
- 步骤 ***6***：每个 TC 中每个多径分量（MP）的到达时间（TOA）通过 GetIntraClusterDelays，按照表 3 - 步骤 4 中规定的分布计算。
- 步骤 ***7***：在 GetSubpathPhases 方法中，使用 $(0,2\pi)$ 内的均匀随机变量描述每个极化（V-V、V-H、H-V 和 H-H）对应的多径分量（MP）相位。
- 步骤 ***8***：GetClusterExcessTimeDelays 根据表 3 - 步骤 3 中所示的分布计算每个 TC 的时延。
- 步骤 ***9***：为了在 Get- ClusterPowers 中生成每个 TC 的总功率，我们使用表 3 - 步骤 5 中提到的分布。
- 步骤 ***10***：GetSubpathPowers 使用表 3 - 步骤 6 中规定的分布计算每个多径分量（MP）的功率。
- 步骤 ***11***：在 GetAbsolutePropagationTimes 中，根据发射端与接收端之间的实际距离，计算多径分量的绝对传播时延。每个多径分量的总时延等于该多径分量的绝对时延与在第 2.3 节—步骤 6 中计算出的时延之和。
- 步骤 ***12***：在 GetSubpathMappingAndAngles 中，根据表 3—步骤 9、步骤 10 和步骤 11 中指定的分布，计算每个多径分量的方位角出射角、天顶出射角（ZOD）、方位角到达角（AOA）和天顶到达角（ZOA）。
- 步骤 ***13***：在宽带系统中，能够在时间上分辨出更多多径分量，而在窄带系统中，只能分辨出少数几个多径分量。因此，GetBWAdjustedtedPowerSpectrum 根据工作带宽对多径分量进行矢量合并。其次，获得可分辨的多径分量后，在视距条件下，必须使第一个多径分量的方位角到达角和出发角、ZOA 和 ZOD彼此对齐 [39]；因此，在视距条件下，我们将该方法称为 GetLosAlignedPower-Spectrum，用于对第一个多径分量进行方位角和俯仰角上的几何对齐。
- 步骤 ***14***：接收机只能检测高于特定阈值（$P_{RX,\ Th}$）的功率。因此，在 GetValid-Subapths 方法中，我们移除功率低于最大多径分量功率减去 $P_{RX,\ Th}$ 的多径分量。$P_{RX,\ Th}$ 的值在 DynamicRange 中计算。纽约大学信道探测器的动态范围根据 28 GHz 视距条件下可测得的最大全向路径损耗确定，且与场景无关。
- 步骤 ***15***：GetXpdPerSubpath 为每个多径分量生成相对于 V-V 极化的 H-H 、 V-H 和 H-V 交叉极化 (XPD) 系数值。
- 步骤 ***16***：我们使用 3GPP 天线模型 [32], , 该模型采用 3GPP TR 38. 中描述的全局坐标系 (GCS)901 [1] , 以便为 NYUSIM 生成信道矩阵。在 GCS 中，方位角相对于 x 轴测量，俯仰角相对于 z 轴测量。然而，在 NYUSIM 中，方位角和俯仰角均相对于 y 轴测量。因此，我们使用 NYU-CordinateSystemToGlobalCordinateSystem 方法，将每个多径分量生成的 AOA、出发角、ZOA 和 ZOA 转换为 GCS。
- 步骤 ***17***：最后，我们在 GetNewChannel 中计算 NYUSIM 的多输入多输出信道矩阵。详情见第 2.4 节。

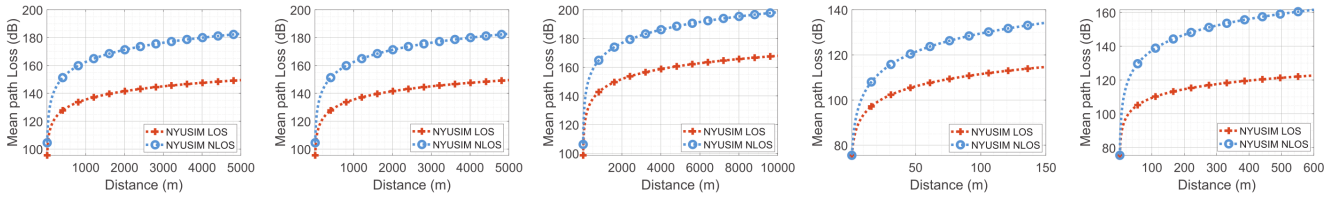
用于在 ns-3 中生成 NYUSIM 小尺度多径分量模型的统计分布和参数值，基于 *NYUSIM* 的 MATLAB 实现；该实现自 2016年 起已被全球研究人员使用。表 3 中的分布分别使用 28 GHz 和 140 GHz 下表 1 和表 2 所列的参数值进行表征。所有分布（表 3）、参数值（表 1 和表 2）以及方法（步骤 1-17）均在文件 nyu-channel-model.cc 中实现。要获取任意特定频率下的小尺度多径分量模型参数，我们使用公式 (6)。

2.4 NYUSIM 的信道矩阵

Tx 与 Rx 天线之间的所有路径均通过无线信道矩阵 **H** 捕获。它提供了无线信道的数学表示，可用于分析无线通信系统的性能并优化其设计。ns-3 中为 NYUSIM 实现了一个类似于 3GPP TR 38.901 [1, 32] 的 **H** ，其表达式见公式 (7)

$$H(\tau,t)=\sum_{m=1}^{M}H_{u,s,m}(t)\delta(\tau-\tau_m), \tag{7}$$

其中， M 表示多径分量的总数， m 表示 m^{th} 多径分量， τ_m 是 m^{th} 多径分量的时延。信道系数



（a）城市微蜂窝的平均路径损耗 （b）M 城市宏蜂窝的平均路径损耗 （c）农村宏蜂窝的平均路径损耗 （d）室内热点的平均路径损耗 （e）室内工厂的平均路径损耗 F

图3：使用 NYUSIM，在 142 GHz 下所有 3GPP列出的场景中，视距/非视距条件下的大尺度平均路径损耗（dB）与距离（m）的关系

表1：NYUSIM 在 28 GHz 下所有 3GPP列出的场景（城市微蜂窝、城市宏蜂窝、农村宏蜂窝、室内热点和室内工厂）的信道参数

信道参数		UMi		UMa		RMa		InH		InF	
		LOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS	NLOS	视距	非视距
路径损耗	n	2	3.2	2	2.9	NA	NA	1.2	2.7	Data not 可用性 可用 at 28 GHz	
阴影衰落	χ_σ^{CI}	4	7	4	7	1.7	6.7	3	9.8		
数量 时间簇	N_c, λ_c	N_c = 6	N_c = 6	N_c = 6	N_c = 6	N_c = 1	N_c = 1	λ_c = 3.6	λ_c = 5.1		
数量 簇 子路径	M_s, μ_s, β_s	M_s = 30	M_s = 30	M_s = 30	M_s = 30	M_s = 2	M_s = 2	β_s = 0.7 μ_s = 3.7	β_s = 0.7 μ_s = 5.3		
簇超额亚洲视频 时延	μ_τ [ns]	123	83	123	83	123	83	17.3	10.9		
簇内 子路径超额部分 时延	X, μ_ρ [ns]	X = 0.2	X = 0.5	X = 0.2	X = 0.5	X = 0.2	X = 0.5	μ_ρ = 3.4	μ_ρ = 22.7		
簇功率	Γ [ns], σ_Z [dB]	25.9, 1	51, 3	25.9, 1	51, 3	25.9, 1	51, 3	20.7, 10	23.6, 10		
子路径功率	γ [纳秒], σ_U [分贝]	16.9, 6	15.5, 6	16.9, 6	15.5, 6	16.9, 6	15.5, 6	2, 5	9.2, 6		
空间波瓣数 空间波瓣	$\lambda_{l,AOD}, \lambda_{l,AOA}$	1.9, 1.8	1.5, 2.1	1.9, 1.8	1.5, 2.1	1, 1	1, 1	3, 3	3, 3		
平均波瓣 俯仰角 [°]	$\mu_{l,ZOD}, \sigma_{l,ZOD}$	-12.6, 5.9	-4.9, 4.5	-12.6, 5.9	-4.9, 4.5	-12.6, 5.9	-4.9, 4.5	-7.3, 3.8	-5.5, 2.9		
	$\mu_{l,ZOA}, \sigma_{l,ZOA}$	10.8, 5.3	3.6, 4.8	10.8, 5.3	3.6, 4.8	10.8, 5.3	3.6, 4.8	7.4, 3.8	5.5、2.9		
子路径 角偏移 [°]	$\sigma_{\phi,AOD}, \sigma_{\theta,ZOD}$	8.5, 2.5	11, 3	8.5, 2.5	11, 3	8.5, 2.5	11, 3	20.6, 15.7	27.1, 16.2		
	$\sigma_{\phi,AOA}, \sigma_{\theta,ZOA}$	10.5, 11.5	7.5, 6	10.5, 11.5	7.5, 6	10.5, 11.5	7.5, 6	17.7, 14.4	20.3, 15.0		

$H_{u,\ s,\ m}(t)$在时间 t 处使用(8)计算

$$H_{u,s,m}(t) = \alpha_m \begin{bmatrix} F_{rx,u,\theta}(\theta_{m,ZOA}, \phi_{m,AOA}) \\ F_{rx,u,\phi}(\theta_{m,ZOA}, \phi_{m,AOA}) \end{bmatrix}^{\top} \begin{bmatrix} exp(j\phi_m^{\theta\theta}) & \sqrt{\frac{1}{K_{m_{\theta,\phi}}}} \exp(j\phi_m^{\theta\phi}) \\ \sqrt{\frac{1}{K_{m_{\phi,\theta}}}} exp(j\phi_m^{\phi\theta}) & \sqrt{\frac{1}{K_{m_{\phi,\phi}}}} \exp(j\phi_m^{\phi\phi}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{tx,s,\theta}(\theta_{m,ZOD}, \phi_{m,AOD}) \\ F_{tx,s,\phi}(\theta_{m,ZOD}, \phi_{m,AOD}) \end{bmatrix} \exp\left[\frac{j2\pi(\hat{r}_{rx,m}^T . \bar{d}_{rx,u})}{\lambda_o}\right] \exp\left[\frac{j2\pi(\hat{r}_{tx,m}^T . \bar{d}_{tx,s})}{\lambda_o}\right], \quad (8)$$

其中， α_m 是接收到的 m^{th} 多径分量的幅度。交叉极化鉴别率 $K_{m_{\theta,\ \phi}}$、$K_{m_{\phi,\ \theta}}$、$K_{m_{\phi,\ \phi}}$采用线性尺度，并使用 NYUSIM 计算 [8]。此外，为每个多径分量生成 $\phi_m^{\theta\theta}$， $\phi_m^{\theta\phi}$， $\phi_m^{\phi\theta}$， $\phi_m^{\phi\phi}$，其取值范围为 (0， 2π)。式 (8) 中其余参数的详细说明见 [1]。

2.5 功率谱密度的计算

NYUSIM 中接收功率谱密度的计算与 [43]类似，如式 (9) 所示，

$$S_{rx}(t,f) = S_{tx}(t,f) w_{rx}^T H(t,f) w_{tx}, \quad (9)$$

其中， $S_{tx}(t,\ f)$ 表示发射信号的功率谱密度， w_{rx}和w_{tx}分别表示接收端和发射端的波束成形向量，而$H(t,\ f)$ 表示频域中的信道矩阵。对信道矩阵（7）和

表 2：NYUSIM 在所有 3GPP 列出的场景（城市微蜂窝、城市宏蜂窝、农村宏蜂窝、室内热点和室内工厂）中 140 GHz 下的信道参数

信道参数		UMi		UMa		RMa		InH		InF	
		LOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS	NLOS
路径损耗	n	2	2.9	2	2.9	NA	NA	1.8	2.7	1.7	3.1
阴影衰落	χ_σ^{CI}	2.6	8.2	2.6	8.2	1.7	6.7	2.9	6.6	3	7
数量时间簇	N_c, λ_c	N_c = 5	N_c = 3	N_c = 5	N_c = 3	N_c = 1	N_c = 1	λ_c = 0.9	λ_c = 1.8	λ_c = 2.4	λ_c = 2
数量簇子路径	μ_s, M_s, β_s	μ_s = 1.8	μ_s = 3	μ_s = 1.8	μ_s = 3	M_s = 2	M_s = 2	β_s = 1 μ_s = 1.4	β_s = 1 μ_s = 1.2	β_s = 1 μ_s = 2.6	β_s = 1 μ_s = 7
簇超额时延 [ns]	$\mu_\tau, \alpha_\tau, \beta_\tau$	μ_τ = 80	μ_τ = 58	μ_τ = 80	μ_τ = 58	μ_τ = 80	μ_τ = 58	μ_τ = 14.6	μ_τ = 21	α_τ = 0.7 β_τ = 26.9	α_τ = 0.8 β_τ = 13.9
簇内子路径超额时延 [ns]	$\mu_\rho, \alpha_\rho, \beta_\rho$	μ_ρ = 30	μ_ρ = 33	μ_ρ = 30	μ_ρ = 33	μ_ρ = 30	μ_ρ = 33	μ_ρ = 1.1	μ_ρ = 2.7	α_ρ = 1.2 β_ρ = 16.3	α_ρ = 1.6 β_ρ = 9
簇功率	<escape>Γ [ns], σΓ</escape> [dB]	40, 5.34	49, 4.68	40, 5.34	49, 4.68	40, 5.34	49, 4.68	18.2, 9	16.1, 10	16.2,10	18.7,6
子路径功率	γ [纳秒], σ_U [dB]	20, 3.48	37, 3.62	20, 3.48	37, 3.62	20, 3.48	37, 3.62	2, 5	2.4, 6	4.7, 13	7.3, 11
数量 of 空间波瓣	$\lambda_{l,AOD}, \lambda_{l,AOA}$	1.4, 1.2	1.3, 2.1	1.4, 1.2	1.3, 2.1	1, 1	1, 1	2, 2	3, 2	1.8, 1.9	1.8, 2.5
平均波瓣	$\mu_{l,}^{ZOD}, \sigma_{l,ZOD}$	-3.2, 1.2	-1.6, 0.5	-3.2, 1.2	-1.6, 0.5	-3.2, 1.2	-1.6, 0.5	-6.8, 4.9	-2.5, 2.7	-4, 4.3	-3, 3.5
俯仰角角度 [°]	$\mu_{l,ZOA}, \sigma_{l,ZOA}$	2, 2.9	1.6、2	2, 2.9	1.6、2	2, 2.9	1.6、2	7.4, 4.5	4.8, 2.8	4, 4.3	3, 3.5
子路径角度偏移量 [°]	$\sigma_{\phi,AOD}, \sigma_{\theta,ZOD}$	4.3, 0.1	5, 2.3	4.3, 0.1	5, 2.3	4.3, 0.1	5, 2.3	4.8, 4.3	4.8, 2.8	6.7, 3	9.3, 4.5
	$\sigma_{\phi,AOA}, \sigma_{\theta,ZOA}$	7.3, 3.2	7.5, 0	7.3, 3.2	7.5, 0	7.3, 3.2	7.5, 0	4.7, 4.4	6.6, 4.5	11.7, 2.3	14.1, 3.2

（8）中的信道系数进行傅里叶变换后，（9）可表示为

$$S_{rx}(t,f) = S_{tx}(t,f)\sum_{n=1}^{N}\sum_{s=1}^{S}\sum_{u=1}^{U} w_{rx,u}H_{u,s,n}w_{tx,s}e^{j2\pi v_n t}e^{j2\pi\tau_n f}$$
$$= S_{tx}(t,f)\sum_{n=1}^{N} L_n e^{j2\pi v_n t}e^{j2\pi\tau_n f}, \quad (10)$$

其中，N表示多径分量的总数，S和U表示多输入多输出（MIMO）的发射端和接收端天线数量，v_n和τ_n表示n^{th}多径分量的多普勒扩展和时延。L_n称为多径分量n的长期分量，其定义为

$$L_n = \sum_{s=1}^{S}\sum_{u=1}^{U} w_{rx,u}H_{u,s,n}w_{tx,s}. \quad (11)$$

NYUSpectrumPropagationLossModel 继承自 SpectrumPropagationLossModel。NYUSpectrumPropagationLossModel 类从 NYUChannelModel 获取信道系数。DoCalcRxPowerSpectralDensity 方法的功能是计算式 (10)。所有这些方法，即 DoCalcRxPowerSpectralDensity、GetLong-Term 和 CalcBeamformingGain，其实现方式与 3GPP SCM 的实现类似，详情请参阅 [43] 的第 3.5 节。

3 ns-3 中使用 NYUSIM 的示例

Spectrum 模块中包含的示例文件 nyu-channel-example.cc 展示了在 ns-3 中使用 NYUSIM 无线信道的方法，可与 ns-3 中的毫米波 [17] 结合，用于跨层设计的端到端网络性能评估。不过，出于演示目的，本示例仅计算平均路径损耗值。对于每种场景和信道条件，脚本 nyu-channel-example.cc 均运行一次，持续 10 秒，并假设基站高度为 35 m。平均路径损耗值是在 10 秒内计算得出的。图3展示了在 142 GHz 下，使用脚本 nyu-channel-example.cc 在视距和非视距信道条件下，各种场景中的传播损耗与距离的关系。

创建和配置信道模型类的流程（假设选择了城市宏蜂窝场景）如下：

(1) 第一步中创建一个 NYUUmaChannelConditionModel 实例。

表 3：NYUSIM 在 0.5–150 GHz 频率范围内用于 3GPP列出的场景的分布

Step	信道参数	UMi	UMa	RMa	InH	InF
1	时间簇数量（N）	N ~离散均匀分布 $(1,N_c)$ *离散均匀分布：离散均匀分布			N ~ 泊松分布(λ_c) + 1	
2	簇的数量 子路径数量 (M_n)	< 100GHz M_n ~ 离散均匀分布$(1, M_s)$		M_n ~ 离散均匀分布(1, M_s)	$M_n \sim (1-\beta)\delta(M_n) + \mathrm{DE}(\mu_s)$ *DE：离散指数分布	
		≥ 100GHz Mn ~Exp(μ_s)				
3	簇超额时延 τ_n (ns)	$\tau_n = \tau_{n-1} + \rho_{M_{n-1},n-1} + \Delta\tau_n$ +MTI,				
		$\Delta\tau_n$ ~Exp(μ_τ) MTI = 25纳秒			$\Delta\tau_n$ ~ Exp(μ_τ) 或 Logn(μ_τ, σ_τ) MTI = 6 纳秒	$\Delta\tau_n$ ~ 伽马函数(α_τ, β_τ) MTI = 8 纳秒
4	簇内子路径超额时延 $\rho_{m,\ n}$ (纳秒)	< 100吉赫兹 $\rho_{m,n} = \left[\frac{1}{B_{bb}} \times (m-1)\right]^{1+X_n}$, m = 1,2,..M_n n = 1,2,..,N			$\rho_{m,n}$ ~Exp(μ_ρ)	$\rho_{m,\ n}$ ~ 伽马(α_ρ, β_ρ)
		≥ 100吉赫兹 $\rho_{m,\ n}$ ~指数函数(μ_ρ)				
5	簇功率 P_n (毫瓦)	$P'_n = \bar{P}_0 e^{-\frac{\tau_n}{\Gamma}} 10^{\frac{Z_n}{10}}$ $P_n = \frac{P'_n}{\sum_{k=1}^{N} P'_k} \times P_T$[毫瓦] $Z_n \sim \mathcal{N}(0, \sigma_Z)$ n = 1, 2, ..., N				
6	子路径功率 $\Pi_{m,n}$ (mW)	$\Pi'_{m,n} = \bar{\Pi}_0 e^{\frac{\rho_{m,n}}{\gamma}} 10^{\frac{U_{m,n}}{10}}$ $\Pi_{m,n} = \frac{\Pi'_{m,n}}{\sum_{k=1}^{M_n} \Pi'_k} \times P_n$[毫瓦] $U_{m,\ n} \sim \mathcal{N}(0,\ \sigma_U)$ m = 1, 2, ..., M_n				
7	子路径相位 φ (弧度)	均匀分布(0,2π)				
8	空间波瓣数 (L_{AOD}, L_{AOA})	L ~ 泊松分布(λ_l) + 1			L ~ 离散均匀分布 (, λ_l)	L ~ 泊松分布(λ_l) + 1
9	平均波瓣方位角角度 ϕ_i(°)	ϕ_i ~ 均匀分布(ϕ最小值 ϕ最大值) $\phi_{最小值} = \frac{360(i-1)}{L}$, $\phi_{最大值} = \frac{360i}{L}$, i = 1, 2, ..., L				
10	平均波瓣仰角角度 θ_i(°)	θ_i ~ 高斯(μ_l, σ_l)				
11	子路径角偏移量 来自 ($\Delta\phi, \Delta\theta$) 的平均波瓣角 ϕ_i, θ_i	$(\Delta\phi_i)_{m,n,AOD}$ ~ N (0,$\sigma_{\phi,AOD}$) $(\Delta\theta_i)_{m,n,ZOD}$ ~ N (0,$\sigma_{\theta,ZOD}$) $(\Delta\phi_j)_{m,\ n,\ AOA}$ ~N (0, $\sigma_{\phi,\ AOA}$) $(\Delta\theta_j)_{m,n,ZOA}$ ~北 (0, $\sigma_{\theta,ZOA}$)				

(2) 创建一个 NYUUmaPropagationLossModel 实例，使用“ChannelCondition- Model”属性设置信道条件模型，并使用“Frequency”属性配置载波频率。

(3) 创建 NYUSpectrumPropagationLossModel 实例时，通过属性“Scenario”“Frequency”“RfBandwidth”和“ChannelConditionModel”设置 UMa 场景、载波频率、带宽和信道条件模型；

(4) 为每个设备创建一个 ThreeGppAntennaArrayModel 实例，然后调用 NYUSpectrumPropagationLossModel::AddDevice 方法，将设备—天线关联告知 NYUSpectrumPropagationLossModel 类。

此外， [22] 展示了针对单用户场景，使用 3GPP SCM 和 NYUSIM 在 28 GHz 下进行的全栈端到端网络仿真的详细比较。NYUSIM 的其他使用场景与 [43] 中所述的 3GPP SCM 使用场景类似。

4 结论和未来工作

In th是北极le，我们介绍了 d 我们的实现 l实现 o f the d

在 ns-3 中实现基于抽取的 NYUSIM，以运行蒙特卡洛仿真 [41]，评估调制解调器和端到端无线系统在协议栈各层的性能 [22]。这项工作将使研究界能够使用现实世界中基于测量的信道模型，研究毫米波和亚太赫兹频段的无线信道对系统/网络性能的影响，涵盖 3GPP 列出的场景。在第 1 节中，我们强调了 3GPP SCM 的局限性，以及使用准确的基于测量的信道模型来设计未来无线系统的重要性。第 2 节介绍了 NYUSIM 在 ns-3 中的实现细节。最后，第 3 节列出了 NYUSIM 的示例和使用场景。未来，我们计划为所有 3GPP SCM 列出的场景实现基于 NYUSIM 的阻塞模型，并为室内热点、农村宏蜂窝和室内工厂场景创建视距概率模型。此外，我们还将为 ns-3 中的 NYUSIM 添加基于空间一致性的模型，并将 NYUSIM 模型扩展到 150 GHz 以上，以适用于 3GPP 列出的场景。

致谢

我们感谢 Tom Henderson 的支持。本研究得到 NYU WIRELESS 工业附属计划以及日本国立信息通信技术研究所 (NICT) 委托研究项目（编号 04201）的支持。

参考文献

[1] 3GPP. 2020年. *0.5 至 100 GHz* 频率范围信道模型研究. 技术报告（TR）38.901. 版本 16.1.0. [2] FCC. 2019年. “频谱地平线”，第一份报告和命令——ET 档案号 18-21，美国华盛顿特区，3月. (2019). [3] Victor Fung, Theodore S. Rappaport, 和 Berthold Thoma. 1993年. 使用双射线和基于测量的脉冲响应模型对 π/4 DQPSK 移动无线电通信进行误码仿真. *IEEE*通信领域精选期刊 11, 3 (1993), 393–405.[4] Katsuyuki Haneda, Jianhua Zhang, Lei Tan, Guangyi Liu, Yi Zheng, Henrik Asplund, Jian Li, Yi Wang, David Steer, Clara Li, 等. 2016年. 适用于室外城市微蜂窝和宏蜂窝环境的类 3GPP 5G信道模型. 载于第*83*届车辆技术会议（*VTC* 春季会议）. IEEE, 中国南京. [5] Wei Jiang, Bin Han, Mohammad Asif Habibi, 和 Hans Dieter Schotten. 2021年. 通往 6G 之路：全面综述 . *IEEE* 通信学会开放期刊 2 (2021), 334–366. [6] Shihao Ju, Ojas Kanhere, Yunchou Xing, 和 Theodore S Rappaport. 2019年. 具有空间一致性和人体遮挡特性的毫米波信道仿真器 NYUSIM. 载于 *IEEE*全球通信大会（*GLOBECOM*）. 美国夏威夷. [7] Shihao Ju 和 Theodore S Rappaport. 2023年. 工厂建筑中的 142 GHz 多径传播测量和路径损耗信道建模. *IEEE* 国际通信大会（ *ICC* ） (2023).[8] Shihao Ju, Shu Sun, George R MacCartney, Mathew K Samimi, 和 Theodore S Rappaport. 2016年. NYUSIM：毫米波和亚太赫兹信道仿真器, https://wireless.engineering.nyu.edu/nyusim/. [9] Shihao Ju, Yunchou Xing, Ojas Kanhere, 和 Theodore S Rappaport. 2020年. 毫米波和亚太赫兹频段的三维统计室内信道模型. 载于*IEEE*全球通信大会（*GLOBECOM*）. 中国台北. [10] Shihao Ju, Yunchou Xing, Ojas Kanhere, 和 Theodore S. Rappaport. 2021年. 室内办公楼的毫米波和亚太赫兹空间统计信道模型. *IEEE* 通信领域精选期刊 39, 6 (2021), 1561–1575.[11] Shihao Ju, Yunchou Xing, Ojas Kanhere, 和 Theodore S. Rappaport. 2022年. 工厂建筑中的亚太赫兹信道测量与特性表征. 载于国际通信大会（*ICC*）. 韩国首尔. [12] Hans J. Liebe, George A. Hufford, 和 Michael G. Cotton. 1993年. 1000 GHz 以下频率下湿空气及悬浮水/冰颗粒的传播建模. 载于 *AGARD* (1993). [13] George R MacCartney 和 Theodore S Rappaport. 2017年. 毫米波无线通信的农村宏蜂窝路径损耗模型. *IEEE*通信领域精选期刊 35, 7 (2017), 1663–1677. [14] George R MacCartney 和 Theodore S Rappaport. 2017年. 毫米波无线通信的 3GPP 农村宏蜂窝路径损耗模型研究 . 载于国际通信大会（ *ICC* ） . IEEE, 法国巴黎. [15] George R Maccartney, Theodore S Rappaport, Shu Sun, 和 Sijia Deng. 2015年. 超密集5G无线网络中 28 和 73 GHz 室内办公环境宽带毫米波传播测量与信道模型. *IEEE Access* 3 (2015), 2388–2424. [16] George R MacCartney Jr, Shu Sun, Theodore S Rappaport, Yunchou Xing, Hangsong Yan, Jeton Koka, Ruichen Wang, 和 Dian Yu. 2016年. 毫米波无线通信：农村连接的新成果. 载于第*5*届蜂窝通信相关技术研讨会论文集：运营、应用与挑战. 英国伦敦，31–36.[17] Marco Mezzavilla, Menglei Zhang, Michele Polese, Russell Ford, Sourjya Dutta, Sundeep Rangan, 和 Michele Zorzi. 2018年. 5G毫米波网络的端到端仿真. *IEEE*通信调查与教程 20, 3 (2018), 2237–2263. [18] Next G联盟. 2022年. 5GCM，“100 GHz 以下频段的5G信道模型”，2016年10月21日. (2022). [19] Next G联盟. 2022年. Next G联盟报告：6G路线图. (2022). [20] NYU WIRELESS. 2023年. ns-3 中的 NYUSIM，“https://apps.nsnam.org/app/nyusim/”. (2023). [21] Natale Patriciello, Sandra Lagen, Biljana Bojovic, 和 Lorenza Giupponi. 2019年. 面向5G新空口网络的端到端仿真器. 仿真建模实践与理论 96 (2019), 101933. [22] Hitesh Poddar, Tomoki Yoshimurat, Matteo Pagin, Theodore S. Rappaport, Art Ishii, 和 Michele Zorzi. 2023年. 全栈端到端毫米波无线系统仿真：在 ns-3 中使用 3GPP 和 NYUSIM. 载于 IEEE 国际通信大会（ICC）. 意大利罗马 . [23] Theodore S Rappaport. 2010 年 . 无线通信：原理与实践, 第2版. 印度培生教育出版社.[24] Theodore S. Rappaport 和 Sijia Deng. 2015年. 73 GHz 宽带毫米波树叶和地面反射测量与模型. 载于 IEEE 国际通信研讨会（ICCW）. 英国伦敦. [25] Theodore S Rappaport, Victor Fung, 和 Michael D Keitz. 1993年. 数字无线通信的计算机误码仿真. 美国专利 5,233,628. [26] Theodore S. Rappaport, George R. MacCartney, Mathew K. Samimi, 和 Shu Sun. 2015年. 面向未来无线通信系统设计的宽带毫米波传播测量与信道模型. IEEE通信汇刊 63, 9 (2015), 3029–3056. [27] Theodore S Rappaport, Scott Y Seidel, 和 Koichiro Takamizawa. 1991年. 面向工厂和开放式建筑无线通信系统设计的统计信道冲激响应模型. IEEE通信汇刊 39, 5 (1991), 794–807.[28] Theodore S. Rappaport, Shu Sun, Rimma Mayzus, Hang Zhao, Yaniv Azar, Kevin Wang, George N. Wong, Jocelyn K. Schulz, Mathew Samimi, 和 Felix Gutierrez. 2013年. 面向5G蜂窝网络的毫米波移动通信：可行！ IEEE Access 1 (2013), 335–349. [29] Theodore S. Rappaport, Shu Sun, 和 Mansoor Shafi. 2017年. 5G无线通信中 3GPP 与 NYUSIM 信道模型的研究与比较. 载于 IEEE 第86届车辆技术会议（VTC 秋季会议）. 加拿大多伦多. [30] Theodore S. Rappaport, Yunchou Xing, Ojas Kanhere, Shihao Ju, Arjuna Madanayake, Soumyajit Mandal, Ahmed Alkhateeb, 和 Georgios C. Trichopoulos. 2019年. 100 GHz 以上的无线通信与应用：面向6G及更高代际的机遇与挑战. IEEE Access 7 (2019), 78729–78757. [31] Theodore S. Rappaport, Yunchou Xing, George R. MacCartney, Andreas F. Molisch, Evangelos Mellios, 和 Jianhua Zhang. 2017年. 第五代（5G）无线网络毫米波通信概述——聚焦传播模型. IEEE天线与传播汇刊 65, 12 (2017), 6213–6230. [32] Mattia Rebato, Michele Polese, 和 Michele Zorzi. 2018年. 5G毫米波蜂窝网络中的多扇区与多面板性能. 载于 IEEE全球通信大会（GLOBECOM）. 阿联酋阿布扎比 . [33] Mathew K. Samimi 和 Theodore S. Rappaport. 2016年. 面向5G无线系统设计的三维毫米波统计信道模型. IEEE微波理论与技术汇刊 64, 7 (2016), 2207–2225. [34] Mathew K Samimi 和 Theodore S Rappaport. 2016年. 用于生成类 3GPP 5G毫米波信道冲激响应的局部多径模型参数. 载于 IEEE第10届欧洲天线与传播会议（EuCAP）. 瑞士达沃斯，1–5. [35] Mathew K. Samimi, Theodore S. Rappaport, 和 George R. MacCartney. 2015年. 毫米波室外通信的概率全向路径损耗模型. IEEE无线通信快报 4, 4 (2015), 357–360. [36] Sanjay Shakkottai, Theodore S Rappaport, 和 Peter C Karlsson. 2003年. 无线网络的跨层设计. IEEE通信杂志 41, 10 (2003), 74–80. [37] Rohit Singh 和 Douglas Sicker. 2019年. 超越5G：太赫兹频谱的未来及其对无线通信的影响. 第30届欧洲区域 ITS 会议 (2019). [38] Shu Sun, George R MacCartney, 和 Theodore S Rappaport. 2017年. 一种新型毫米波信道仿真器及其在5G无线通信中的应用. 载于 IEEE 国际通信大会（ICC）. 法国巴黎.[39] Shu Sun, George R MacCartney, Mathew K Samimi, 和 Theodore S Rappaport. 2015年. 面向5G毫米波通信，由定向天线合成全向天线方向图、接收功率和路径损耗. 载于 IEEE全球通信大会（GLOBECOM）. 美国加利福尼亚州.[40] Shu Sun, Theodore S Rappaport, Timothy A Thomas, Amitava Ghosh, Huan C Nguyen, Istvan Z Kovacs, Ignacio Rodriguez, Ozge Koymen, 和 Andrzej Partyka. 2016年. 研究5G无线通信大尺度传播路径损耗模型的预测准确度、敏感度和参数稳定性. IEEE车辆技术汇刊 65, 5 (2016), 2843–2860. [41] William H Tranter, Theodore S Rappaport, Kurt L Kosbar, 和 K Sam Shanmugan. 2004年. 通信系统仿真原理：无线应用. 第1卷. 新泽西州普伦蒂斯霍尔. [42] Yunchou Xing 和 Theodore S. Rappaport. 2021年. 毫米波与太赫兹城市微蜂窝传播测量和模型. IEEE通信快报 25, 12 (2021), 3755–3759.[43] Tommaso Zugno, Michele Polese, Natale Patriciello, Biljana Bojović, Sandra Lagen, 和 Michele Zorzi. 2020年. ns-3 空间信道模型的实现. 载于 ns-3 研讨会论文集（WNS3）. 49–56.