

5G通信网络中毫米波室内路径损耗模型研究

江西科技学院信息工程学院 邱 岚

【摘要】毫米波通信技术作为5G无线宽带网络的关键候选技术之一，能够提供多吉比特的通信服务。由于毫米波的波长要小得多，新的极化和空间处理技术，可以用来补偿毫米波通信的高传播损耗。本文提出了一种新的基于距离的频率衰减路径损耗模型，即FAD（frequency attenuation with distance path-loss model）路径损耗模型，并引入频率相关衰减因子。基于新的和著名的路径损耗模型，对大尺度路径损耗进行了描述。结果表明，我们提出的模型比其他著名模型更简单，更具物理特性。

【关键词】5G；毫米波通信；路径损耗模型；衰减因子

DOI:10.19353/j.cnki.dzsj.2017.24.019

0 引言

大于3GHz的频谱空间，也被称为微波波段。3-30GHz频谱定义为超高频（SHF），而30-300GHz频谱则为极高频（EHF）或毫米波频段。由于SHF和EHF频段的无线电波传播特性相似，则波长从1毫米到100毫米的3-300 GHz频段，可称之为毫米波段^[1]。毫米波段的巨大带宽促使了如今毫米波通信的发明。毫米波通信已经作为5G通信网络的一个重要候选技术之一；它能够提供更吉比特的通信服务，如D2D（device-to-device）通信^[2]，高清电视HDTV（high definition television）和超清视频UHDV（ultra-high definition video）^[3]。今天的手机供应商试图提供高质量、低延迟的视频和多媒体内容，但是鉴于当前全球宽带通信只支持频段700 MHz和2.6 GHz之间，带宽不足的问题常常限制他们^[4]。

目前对于毫米波段的研究主要集中在不同场景和不同频带的分析，但是缺乏信道建模。而在这些频带中通过广义的特性描述和建模来产生一个广义的模型是必需的。本文主要研究这些频段的广义路径损耗模型，针对现有的一些模型提出新的研究方案，主要完成了三项工作。第一，提出了一种新的路径损耗模型来估计频率衰减，称为FAD（frequency attenuation with distance path-loss model）路径损耗模型。第二，对6~40 GHz毫米波段进行了室内传播信道特性分析。对本文提出的新的路径损耗模型和已有的路径损耗模型单频和多频信道损耗特性进行研究。

1 路径损耗模型的建立

路径损耗是描述接收信号的传播信道的主要参数。它测量了基于功率衰减的距离和频率函数的大尺度衰落效应。目前，通过路径损耗模型研究无线信道的传播特性存在着经验性和随机性，然而，对无线信道的传播特性实际还是应该通过路径损耗的测量来获得^[5]。

1.1 CI及CIX路径损耗模型

CI(close-in)路径损耗模型定义如公式1所示^[6]。

$$P_{loss}^{CI}(f, d)[dB] = P_{loss}(f, d_0) + 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{\sigma} \quad (公式1)$$

MMSE算法用于计算路径损耗指数（n）和标准偏差，从CI路径损耗模型可以估计同极化、交叉极化或组合极化的路径损耗。在随机方向的实际蜂窝系统中会发生联合极化。将XPD因子加入CI路径损耗模型，即为CIX路径损耗模型，如公式2所示。

$$P_{loss}^{CIX}(f, d)[dB] = P_{loss}(f, d_0) + 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + XPD + X_{\sigma}^{CIX} \quad (公式2)$$

1.2 XPD因子简化算法

为了避免MMSE算法的计算复杂度，提出XPD因子计算的新方

法。首先，XPL（cross-polarization factor）因子可以通过公式3计算。

$$XPL(f, d)[dB] = P_{loss(V-H)} - P_{loss(V-V)} \quad (公式3)$$

XPD通过公式3计算出所有载频f和距离d的XPL值，取平均，即为XPD，如公式4所示。

$$XPD(f) = \overline{XPL}(f, d) \quad (公式4)$$

则阴影衰落SF（shadow fading） X_{σ}^{CIX} 可以通过公式5计算出来。

$$X_{\sigma}^{CIX} = P_{loss}^{CIX}(f, d)[dB] - P_{loss}(f, d_0) - 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) - XPD \quad (公式5)$$

1.3 FI路径损耗模型

另一个著名的路径损耗模型是 α 、 β 模型，称为FI（floating-intercept）模型，可以定义为公式6^[4]。

$$P_{loss}^{FI}(f, d)[dB] = \alpha + 10\beta \log_{10}(d) + X_{\sigma}^{FI} \quad (公式6)$$

1.4 FAD路径损耗模型的建立

这里提出一种新的路径损耗模型，称为FAD（frequency attenuation with distance path-loss model）路径损耗模型，如公式7所示。

$$P_{loss}^{FAD}(f, d)[dB] = P_{loss}(f_{ref}, d_0) + 10n_{ref} \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + FAF(f) + X_{\sigma}^{FAD} \quad (公式7)$$

式中， $P_{loss}(f_{ref}, d_0)$ 是 d_0 为1m，载频为 f_{ref} 的路径损耗。在这个模型中， f_{ref} 定义为相同标准环境的最低测量频率； n_{ref} 表示频率 f_{ref} 的路径损耗指数PLE（path-loss exponent），可以通过V-V和V-H天线极化的CI路径损耗模型计算。FAF（frequency attenuation factor）是频率衰减因子，用来描述频率变化所引起的信号衰落程度。 X_{σ}^{FAD} 是标准偏差为 σ dB的SF。采用MMSE算法来估算SF和FAF。和CI模型一样，FAD模型也是基于物理的，而且更加简单。

2 单频路径损耗的分析

在发送端，使用任意波形发生器AWG（arbitrary waveform generator）产生一个宽带探测信号。在接收端，通过一个12位的高速数字转换器（带宽为1 GHz）以1 ns多径分辨率采集探测信号。毫米波在6.5 GHz、10.5 GHz、15 GHz、19 GHz、28 GHz和38 GHz这些频率进行测量。测试的环境为室内走廊。

我们研究了不同路径损耗模型在不同频率下的带宽测量。CI、CIX、FI和FAD的所有参数都是使用6.5 GHz、10.5 GHz、15 GHz、19 GHz、28 GHz和38 GHz的同极化（V-V）和交叉极化（V-H）的天线配置。

2.1 CI模型分析

实验测试数据如表1所示。表1列出了在所有频率下V-V和V-H天线极化的CI参数。

这些结果表明，在所有频率下，不论是同极化还是交叉极化，CI模型的PLE值均小于理论自由空间路径损耗（ $n = 2$ ），而且和频率无关。

基金项目：江西省教育厅科学技术研究项目（GJJ151149）。

表1 CI模型实验数据

频率 (GHz)	天线	PLE	σ dB
6.5	V-V	1	3.1
	V-H	1.3	2.3
10.5	V-V	1	2.5
	V-H	1.2	2
15	V-V	1.4	2.8
	V-H	1.9	4.4
19	V-V	0.6	2.2
	V-H	1.4	3
28	V-V	0.9	2.1
	V-H	1.8	3.8
38	V-V	0.8	2.3
	V-H	1.1	2.7

2.2 CIX模型分析

CIX模型采用V-H天线极化的PLE值来估算XPD因子, CIX模型的所有参数值如表2所示。

该表显示, 最大的XPD因子是28 GHz的11.9dB, 这意味着这个频段的交叉极化信号强于同环境的其它频段。XPL因子表示由每个发射机和接收机分离距离的交叉极化所产生的信号附加损耗。为了避免MMSE算法的复杂性, XPD因子可以通过前面简化公式进行计算, XPD因子即为XPL的平均值。值得一提的是, 通过公式4计算出的XPD值和通过公式2计算出的XPD值是相同的。

表2 CIX模型实验数据

频率 (GHz)	天线	PLE ($n_{v,v}$)	XPD [dB]	σ dB
6.5	V-V	-	-	-
	V-H	1	4.3	2.3
10.5	V-V	-	-	-
	V-H	1	2.7	2.2
15	V-V	-	-	-
	V-H	1.4	7.5	3.1
19	V-V	-	-	-
	V-H	0.6	9.3	3.3
28	V-V	-	-	-
	V-H	1.8	11.9	3.3
38	V-V	-	-	-
	V-H	0.8	3.4	2.8

2.3 FI模型分析

表3列出了FI模型参数。

表3 FI模型实验数据

频率 (GHz)	天线	α dB	β dB	σ dB
6.5	V-V	40.7	1	3.1
	V-H	44.3	1.1	2.2
10.5	V-V	45.4	1.3	2.3
	V-H	48.5	1.3	2
15	V-V	51.9	1.4	2.8
	V-H	63.5	1.1	2.9
19	V-V	56.6	0.9	2.1
	V-H	63.3	1.1	2.8
28	V-V	58.7	1.2	2
	V-H	69.1	1.1	3.1
38	V-V	67.9	0.9	2.3
	V-H	70	1	2.7

从表3中可以看出, α 值超出了参考距离1m的V-V极化1.4~8 dB的自由空间路径损耗, 这意味着FI模型不是物理模型。

2.4 FAD模型分析

FAD路径损耗模型的参数如表4所示。

从表4中可以看出, 载频 f_{ref} 为6.5 GHz时, V-V和V-H极化的PLE (n_{ref}) 值分别为1和1.3, 和CI模型相同。38 GHz频带的频率衰减

因子FAF(f) (dB) V-V和V-H是一致的。FAF(f)的最大值为28 GHz频段V-H模型的26.9 dB, 而最小值为10.5 GHz频段V-V模型的7.4 dB。公式10中的FAD模型阴影衰落标准偏差 σ dB高于CI模型的特别频率高的情况下。

表4 FAD模型实验数据

频率 (GHz)	天线	PLE (n_{ref})	FAF(f) [dB]	σ dB
6.5	V-V	1	0	3.1
	V-H	1.3	0	2.3
10.5	V-V	1	7.4	2.5
	V-H	1.3	8.4	2.8
15	V-V	1	15.7	4.1
	V-H	1	19.6	6.9
19	V-V	1.3	13.4	4.8
	V-H	1	19.4	6.8
28	V-V	1.3	18.3	5.3
	V-H	1	26.9	8.4
38	V-V	1	25.4	7.9
	V-H	1.3	25.4	8.5

3 结论

本文介绍了在6.5 GHz、10.5 GHz、15 GHz、19 GHz、28 GHz和38 GHz的毫米波同极化和交叉极化天线的室内信道传播特性。提出了一种新的基于距离的频率衰减路径损耗模型, 该模型被称为FAD路径损耗模型。在这个模型中, 引入和频率相关的衰减因子FAF, 用于反映衰减程度。文中对各种大尺度路径损耗模型的分析表明, 本文提出的FAD模型更简单, 更准确。XPL交叉极化因子的提出简化CI模型XPD因子的计算。这里提出的大尺度路径损耗模型对于在6 GHz以上的不同测量频率下毫米波段的宽带信道特性是很重要的。该路径损耗模型为5G无线网络候选频段毫米波信号降损提供了有价值的信息。当然, 本文对毫米波信道传播特性的分析主要是在不同极化的室内走廊环境中进行的, 旨在研究不同天线极化对路径损耗的影响。在接下来的工作中, 将考虑不同的室内和室外环境的影响, 进一步改进路径损耗模型。

参考文献

- [1]Mo Y,Yu D,Song J,Zheng K,Guo Y.A Beacon Transmission Power Control Algorithm Based on Wireless Channel Load Forecasting in VANETs. PLoS One.2015:1-17.
- [2]刘侠,金东日,胡勤友.水上宽带甚高频(B-VHF)无线通信系统的性能分析[J].电子技术应用,2016,42(11):92-94,98.
- [3]Al-Samman AM,Rahman TA,Azmi MH,Hindia MN,Khan I,Hanafi E (2016) Statistical Modelling and Characterization of Experimental mm-Wave Indoor Channels for Future 5G Wireless Communication Networks. PLoS ONE 11(9):e0163034.https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163034.
- [4]Rappaport TS,MacCartney GR,Samimi MK,Sun S.Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models for Future Wireless Communication System Design.IEEE Trans Commun. 2015;63:3029 - 3056.
- [5]Du Q,Song H,Xu Q,Ren P,Sun L.Interference-controlled D2D routing aided by knowledge extraction at cellular infrastructure towards ubiquitous CPS. Pers Ubiquitous Comput.Springer London;2015;19:1033 - 1043.
- [6]Syed Hassan Ahmed SHB and HS.Multimedia Streaming in Named Data Networks and 5G Networks.IEEE COMSOC MMTC E-Letter.2016,11:57-61.

通信作者:

邱岚(1984—),女,研究生,讲师,主要研究方向:无线通信、车联网技术。