



MIMO 信道仿真模型比较及其验证

赵雄文^{1,2}, 高波¹

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206;

2. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要:建立在几何上的 WINNER 模型和 COST2100 随机信道模型是第四代(4G)移动通信 MIMO(multi-input multi-output, 多输入多输出)信道仿真中两个最为典型的仿真模型, 在 4G 信道仿真中得到广泛应用。由于 WINNER 模型和 COST2100 模型不同的物理机制, 还缺乏对这两种模型的和在具体应用场景下的有效性和契合度的研究。在室内环境中开展了 WINNER 模型和 COST2100 信道仿真比较与验证研究, 在视距和非视距的情况下, 对信道的功率时延谱、莱斯因子、信道容量、时延扩展和角度扩展等信道特征参数进行仿真对比, 再利用实际测试数据的分析结果作为佐证, 验证两个模型的契合度以及模型的实用性。

关键词: WINNER 信道模型; COST2100 信道模型; 功率时延谱; 莱斯因子; 信道容量; 时延扩展; 角度扩展

中图分类号: TN011

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016066

Comparisons and validations on MIMO channel simulation models

ZHAO Xiongwen^{1,2}, GAO Bo¹

1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China

Abstract: WINNER and COST2100 channel models are geometry based statistical models, they are the most important channel models for MIMO (multi-input multi-output) system simulations in the fourth generation (4G) radio systems. Due to different physical mechanism advantages for WINNER and COST2100 models, there is almost no work available for the comparative studies between the two channel models and effectiveness and agreement in a specific scenario. The channel simulation and measurement studies for the two channel models in indoor environment was focused on. In the line-of-sight (LOS) and non-line-of-sight (NLOS) cases, the power-delay-profile (PDP), Ricean factor, channel capacity, rms delay and rms angular spread were simulated using the two channel models and measurement data. The comparative studies between the simulation and measurement results are performed to test the effectiveness and agreement of the two models in a practical application environment.

Key words: WINNER channel model, COST2100 channel model, power delay profile, Ricean factor, channel capacity, delay spread, angle spread

收稿日期: 2015-10-07; 修回日期: 2016-01-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61372051); 东南大学移动通信国家重点实验室项目(No.2016D09)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.61372051), Open Research Fund of National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University (No.2016D09)



1 引言

由于第四代(fourth generation, 4G)移动通信链路和系统仿真的需要,基于几何的随机信道模型的研究近年来一直是信道建模领域的研究热点^[1]。如 3GPP 标准提出了 MIMO 空间信道模型(spatial channel model, SCM)^[2],欧洲 4G WINNER^[3]项目将 SCM 进行扩展,得到 SCME (SCM extension)。SCME 由原来支持的 5 MHz 信道带宽扩展到 100 MHz,载频由 2 GHz 扩展到 6 GHz。随着 WINNER 模型的升级和完善,其仿真模型已成为 ITU-R^[4]和 3GPP 标准化的重要组成部分之一。COST2100 信道模型也是近几年在欧洲建立的基于几何的随机信道模型,该模型是由 COST207、COST231 和 COST273 等模型演进而来^[5]。国内对 MIMO 信道的研究主要集中在 MIMO 信道容量^[6]、信道估计^[7]以及传输特性^[8]。对于 MIMO 信道仿真模型,主要由北京邮电大学、东南大学等高校与中兴通讯、华为公司等企业在 863 Future 项目中开展研究^[9],在芬兰、中国、韩国和日本等国家的共同努力下,WINNER 已成为 ITU 和 3GPP 组织的标准化模型。随着第四代移动通信 LTE-A (long term evolution-advanced)标准化和第五代(fifth generation, 5G)移动通信的发展,3D MIMO 信道模型和仿真研究已成为目前国内外关注的热点^[10-12]。国际标准化组织 3GPP 提出了基于 WINNER 的 3D MIMO 模型^[10],其核心思想是将 WINNER 2D 模型扩展到三维,考虑电波垂直空间域的贡献。近两年,国内在 3D MIMO 信道模型和仿真方面也开展了一些工作,对 3D 基本原理和技术进行了研究^[11],并在特定场景中开展了信道测试、建模和仿真,研究表明 3D 模型对信道容量等有明显改善^[12]。

WINNER 模型和 COST2100 模型的传播物理机制不同,在 WINNER 信道仿真模型中,通过对不同实际环境的测试及其数据处理分析,得到其参数的统计概率分布,根据其概率分布产生随机数再代入仿真模型进而实现信道。WINNER 仿真模型中簇的个数是通过分析根据实测信道响应得到的时延功率谱(power delay profile, PDP)得到,每个簇中规定有 20 个子径。WINNER 模型适用性强、复杂度适中,被广泛采用。但由于其建模机制和信道参数随机产生等原因,对具体链路上的多用户,难以确保信道预测的一致性和连续性。COST2100 模型中,簇被定义为环境中而不是某个专门的链路中。每个簇都有一个可视区,当 MS (mobile station, 移动站)位于某个可视区内时,该簇才会对

信道冲击响应产生影响。相比 WINNER 模型, COST2100 仿真模型更适用于多用户环境,同时可支持平滑时间演进。但 COST2100 模型缺乏实测场景,仿真中对于簇参数的确定是十分困难的^[13]。由于 COST2100 模型不同的物理传播机制及其具有的优点,使其成为近几年信道领域研究的热点。综上所述,WINNER 模型和 COST2100 模型是当前大家普遍关注的 MIMO 信道仿真模型,但其建立的物理机制不同,目前还缺乏借助实验开展对两种模型的比较和验证研究,来回答两种模型的契合度及其有效性问题。

本文借助室内 MIMO 信道的实际测试开展对两种信道仿真模型的比较和验证研究。在 LOS (line-of-sight, 视距)和 NLOS (non-line-of-sight, 非视距)两种情况下,根据实测信道响应,首先确定 WINNER 模型和 COST2100 仿真模型的输入参数,利用其仿真平台,实现两种模型的信道仿真矩阵,再利用信道仿真矩阵分析其信道特征参数和模型,最后与实测数据进行比较研究,验证两种模型的契合度和有效性。本文研究中信道特征参数包括均方根时延扩展、莱斯因子、信道容量以及信道的时延功率谱^[14](PDP)等。

2 信道测量和环境

本文基于欧洲 4G WINNER 项目,利用芬兰 Elektrobitt 时域信道探测器开展室内 SISO 信道测试工作,测试地点在芬兰奥卢大学办公楼内。测试中心频率为 5.3 GHz,带宽为 100 MHz,具体测量参数见表 1。室内测试环境分为以下 3 种情况^[15]。

- 楼道—楼道 LOS 和 NLOS 测试:发射机和接收机都位于楼道。
- 房间—楼道及楼道—房间 NLOS 测试:发射机在房间,接收机在楼道,反之亦然。
- 房间—房间 LOS 和 NLOS 测试:发射机和接收机都在房间。

表 1 SISO 信道测量主要参数

参数	数值
载频/GHz	5.3
带宽/MHz	100
发射功率/dBm	26
接收机速度/(km·h ⁻¹)	0~5
采样速率/MHz	640
码片速率/MHz	100

3 信道建模理论基础

3.1 COST2100 信道模型

在实际的蜂窝通信中,电波从 BS(base station, 基站)通过一定的实际传播环境到达移动台。在 COST2100 模型中,用 MPC(multipath component, 多径分量)来模拟实际环境中的散射体,电波经过反射、绕射以及散射形成多径。MPC 的特性可从时延域和角度域进行描述,角度域用水平面电波发射角、垂直面电波发射角、水平面电波到达角和垂直面电波到达角来描述。建模时,具有相近时延特性和角度特性的一组 MPC 构成一个簇。在 COST2100 模型中,簇被分成两种:本地簇和远端簇,本地簇位于 MS 或 BS 周围;远端簇离 MS 和 BS 较远。其中远端簇又可分为单跳簇和多跳簇。单链路 COST2100 MIMO 信道一般模型如图 1 所示^[5]。

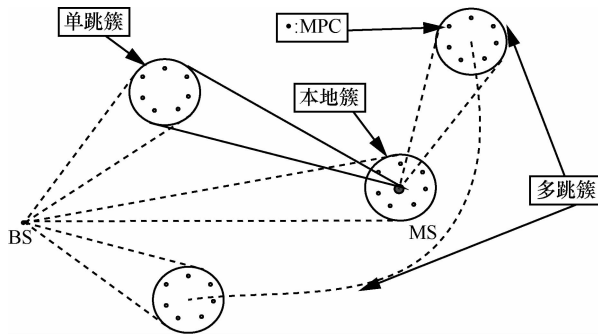


图 1 COST2100 信道模型的几何结构

COST2100 信道模型在时延和角度域计算时变的 CIR (channel impulse response, 信道冲击响应), 具体计算式为:

$$h(t, \tau, \Omega^{\text{BS}}, \Omega^{\text{MS}}) = \sum_{n \in \zeta} \sum_p \alpha_{n,p} \delta(\tau - \tau_{n,p}) \delta(\Omega^{\text{BS}} - \Omega_{n,p}^{\text{BS}}) \delta(\Omega^{\text{MS}} - \Omega_{n,p}^{\text{MS}}) \quad (1)$$

其中, ζ 为可见簇, $\alpha_{n,p}$ 是第 n 个簇中第 p 个 MPC 的复振幅, $\Omega_{n,p}^{\text{BS}}$ 和 $\Omega_{n,p}^{\text{MS}}$ 分别是第 n 个簇中第 p 个 MPC 的离开角 (AAOD/EAOD) 和到达角 (AAOA/EAOA)。

式(1)中没有考虑天线对信道响应的影响,对于 MIMO 系统,假设 U 和 V 分别表示发射端和接收端天线阵列的单元数,所得到的 $U \times V$ 的 MIMO 信道矩阵 $H(t, \tau)$ 可表示为:

$$\begin{aligned} H(t, \tau) &= \iint h(t, \tau_n, \Omega^{\text{BS}}, \Omega^{\text{MS}}) s_{\text{BS}}(\Omega^{\text{BS}}) s_{\text{MS}}(\Omega^{\text{MS}}) d\Omega^{\text{BS}} d\Omega^{\text{MS}} \\ &= \sum_{n \in \zeta} \sum_p \alpha_{n,p} (t, \tau_n, \Omega_{n,p}^{\text{BS}}, \Omega_{n,p}^{\text{MS}}) s_{\text{BS}}(\Omega_{n,p}^{\text{BS}}) s_{\text{MS}}(\Omega_{n,p}^{\text{MS}}) \cdot \delta(\tau - \tau_{n,p}) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $s_{\text{BS}}(\Omega_{n,p}^{\text{BS}})$ 和 $s_{\text{MS}}(\Omega_{n,p}^{\text{MS}})$ 分别是 BS 和 MS 天线阵列方向矢量。对式(2)中的信道矩阵 $H(t, \tau)$ 做进一步变化可得:

$$H(t, \tau) = \frac{1}{L} \sum_{n \in \zeta} V_n \sqrt{\frac{S_n}{L_n}} \left[\sum_{p=1}^P a_{n,p} s_t(\Omega_{n,p}) \cdot s_r(\Psi_{n,p}) \delta(\tau - \tau_n^{(l)} - \tau_{n,p}^{(M)}) \right] \quad (3)$$

其中, L 是总的路径损耗,它取决于 BS 与 MS 之间的环境和距离; ζ 是由 MS 位置决定的可见簇的个数; V_n 是 MS 进入或离开可见域簇的可见性增益; $\alpha_{n,p}$ 是在第 n 个簇中的第 p 个 MPC 的高斯衰减; S_n 是簇阴影衰落; L_n 是簇衰减,随着附加时延增加,服从指数衰减规律; $\Omega_{n,p}$ 和 $\Psi_{n,p}$ 分别是第 n 个簇中的第 p 个 MPC 的离开角和到达角; $\tau_n^{(l)}$ 是簇链路时延; $\tau_{n,p}^{(M)}$ 是对应于电波经过路径 BS—散射体—MS 的几何时延。

根据上述建模方法,仿真得到的信道矩阵 $H(t, \tau)$ 中,时延 τ 不是等间隔的,这样不便于其信道特性参数的计算,利用以下计算式将信道矩阵中的时延 τ 等间隔化。

$$H(t, f) = \sum_{n=1}^N [a_n \cdot \exp(-j \cdot 2\pi \cdot f_n \cdot \tau_n)] \quad (4)$$

其中, a_n 是得到第 n 条射线的幅度, τ_n 是第 n 条射线的时延, f_n 是采样频率,起始频率为 $f_1 = f_c - B/2$,截止频率为 $f_N = f_c + B/2$, f_c 为中心频率, B 为射频带宽。选择合适的 Δf 作为步长,使得 $f_n = f_1 + (n-1) \cdot \Delta f$ ($n=1, 2, \dots, N$)。再对式(4)进行反傅里叶变换,就得到时延 τ 等间隔的信道特性矩阵。

3.2 WINNER 信道模型

WINNER 模型与 COST2100 模型都属于基于几何的随机信道模型,这种建模方法可将传播参数与天线参数分开,天线模型可由用户自己配置。信道系数由一些平面子波(具有特定的小尺度参数,如时延、功率、AOA 以及 AOD 等)的叠加和得到^[16]。在 WINNER 建模过程中,对不同场景进行了大量的测试,得到对应的大尺度参数(如均方根时延扩展和均方根角度扩展等)的概率分布函数。在仿真过程中,根据其概率分布函数随机生成对应的大尺度参数。小尺度参数根据大尺度参数的概率分布随机产生。MIMO 信道的传输矩阵可表示为:

$$H(t; \tau) = \sum_{n=1}^N H_n(t; \tau) \quad (5)$$

其中, N 为路径簇的总数, $H_n(t; \tau)$ 由发端天线阵列响



应 F_{tx} 、接收端天线阵列响应 F_{rx} 以及 n 个簇的传输信道矩阵 h_n 得出:

$$H_n(t; \tau) = \iint F_{\text{tx}}(\phi) h_n(t; \tau, \phi, \phi) F_{\text{rx}}^T(\phi) d\phi d\phi \quad (6)$$

对应发送端和接收端天线第 s 、第 u 单元以及第 n 个簇的信道系数为:

$$H_{u,s,n}(t; \tau) = \sum_{m=1}^M \begin{bmatrix} F_{\text{tx},u,V}(\phi_{n,m}) \\ F_{\text{tx},u,H}(\phi_{n,m}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \alpha_{n,m,VV} & \alpha_{n,m,VH} \\ \alpha_{n,m,HV} & \alpha_{n,m,HH} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{\text{rx},s,V}(\phi_{n,m}) \\ F_{\text{rx},s,H}(\phi_{n,m}) \end{bmatrix} \times \exp(j2\pi\lambda_0^{-1}(\bar{\phi}_{n,m} \cdot \bar{r}_{\text{rx},u})) \exp(j2\pi\lambda_0^{-1}(\bar{\phi}_{n,m} \cdot \bar{r}_{\text{tx},s})) \times \exp(j2\pi\nu_{n,m}t) \delta(\tau - \tau_{n,m}) \quad (7)$$

其中, $F_{\text{rx},u,V}$ 、 $F_{\text{rx},u,H}$ 为接收天线 u 单元的垂直和水平极化分量, $F_{\text{tx},s,V}$ 、 $F_{\text{tx},s,H}$ 为发射天线 s 单元的垂直和水平极化分量, $\alpha_{n,m,VV}$ 及 $\alpha_{n,m,VH}$ 为第 n 个簇中第 m 个子径的垂直—垂直极化以及垂直—水平极化的复增益, $\alpha_{n,m,HH}$ 及 $\alpha_{n,m,HV}$ 为第 n 个簇中第 m 个子径的水平—水平极化以及水平—垂直极化的复增益, λ_0 是载波波长, $\bar{\phi}_{n,m}$ 是第 n 个簇中第 m 个子径 AOD 单位矢量, $\bar{\phi}_{n,m}$ 为 AOA 单位矢量, $\tau_{n,m}$ 为时延, $\nu_{n,m}$ 为移动速度, 而 $\bar{r}_{\text{tx},s}$ 、 $\bar{r}_{\text{rx},u}$ 为天线间距^[17]。

4 信道仿真和测试结果的比较分析

4.1 功率时延谱特性

功率时延谱可以由对仿真和测试的时域信道冲激响应分析得到。为满足广义静止和非相关散射条件, 可将视距和非视距路径上的 IR (impulse response, 冲激响应) 分别进行分窗, 取子窗口长度为 1 m, 对应时域采样数为 100 IR。首先将多条路径上得到的 IR 归一化, 然后把得到的所有 IR 数目分为 100 个子窗口。分别计算各子窗口局部 PDP, 最后得到平均的 PDP^[18]。图 2(a) 和图 2(b) 分别为在 LOS 和 NLOS 路径上由 WINNER 和 COST2100 信道仿真得到的平均 PDP。可以看出, 两种模型在 LOS 和 NLOS 路径下, PDP 近似服从指数分布, LOS 和 NLOS 路径下, 两个模型的功率归一化衰减基本一致, 分别为 40 dB 和 45 dB。从整体上看, 两种模型的 PDP 在时延范围及幅度上有较好的契合度。由于在 WINNER 信道仿真中, 将由测试数据得到的 PDP 作为输入, 所以实测数据得到的 PDP 与 WINNER 仿真 PDP 是重合的。

4.2 莱斯 K 因子

基于 WINNER 和 COST2100 仿真矩阵和实测数据, 本文通过矩量法计算莱斯 (Ricean) 因子^[19]。图 3(a) 和图 3(b)

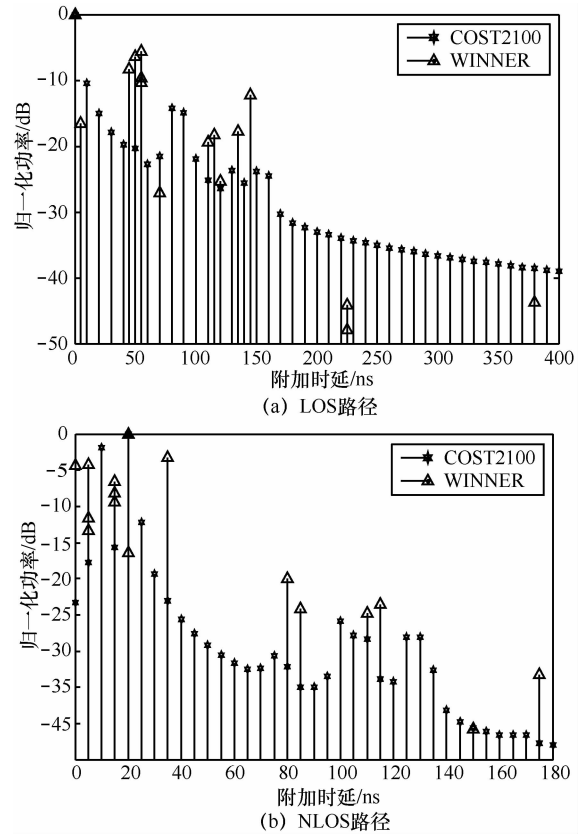


图2 LOS 和 NLOS 路径下 COST2100 信道模型和 WINNER 信道模型 PDP 的比较

分别为 LOS 和 NLOS 路径下, 信道模型和测试数据 K 因子的 CDF (cumulative distribution functions, 累积概率分布函数) 的比较。从图 3 中可以看出, 两个模型结果和测试数据结果有很好的—致性。表 2 和表 3 给出了 K 因子的 CDF 曲线在给定概率点的数值。可以看到在 LOS 及 NLS 场景下, 两个模型及测试数据 K 因子在 CDF 50% 处的结果分别为 12 和 8.5 左右, 这与理论计算的结果有良好的一致性。通过对应概率点的数值对比可以更直观地看到两个模型结果与测量结果的异同。

4.3 MIMO 信道容量

信道容量是衡量 MIMO 系统性能的主要指标之一, 可通过式 (8) 来计算信道容量^[20]。

$$C = \text{lb} \left| I + \frac{SNR}{n_t} R \right| \quad (8)$$

$$R = R = H \cdot \frac{H^H}{\sum_{t=1}^{n_t} \sum_{r=1}^{n_r} H_{r,t}^* H_{r,t}} = n_t \times n_r \times H \cdot \frac{H^H}{\sum_{t=1}^{n_t} \sum_{r=1}^{n_r} H_{r,t}^* H_{r,t}} \quad (9)$$

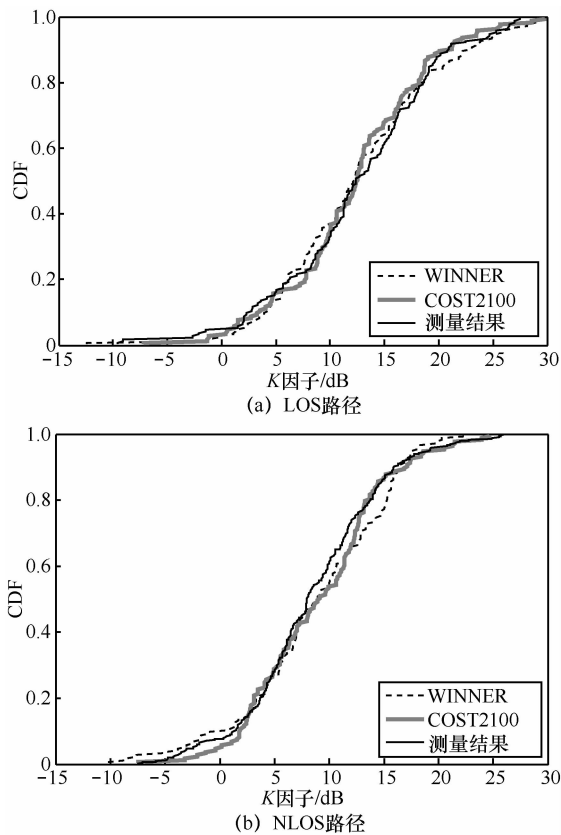


图 3 LOS 和 NLOS 路径下 K 因子累积概率密度分布

表 2 LOS 路径下 K 因子统计值

K 因子/dB	COST2100	WINNER	实验结果
10%	3.47	4.13	3.48
50%	12.46	12.08	12.38
90%	21.13	23.05	22.90
平均值	12.27	12.50	12.39
方差	6.71	7.39	7.43

表 3 NLOS 路径下 K 因子统计值

K 因子/dB	COST2100	WINNER II	实验结果
10%	1.79	1.58	1.37
50%	9.11	8.92	8.02
90%	17.11	16.52	15.97
平均值	9.00	8.71	8.47
方差	6.09	6.68	6.21

式(8)、式(9)中, I 是单位矩阵, R 是信道相关矩阵, H 是信道冲击响应矩阵, $\langle \cdot \rangle$ 代表期望, n_t 和 n_r 分别是发射和接收天线单元的数量。

图 4 为 2×2 和 4×4 MIMO 系统中两种信道模型在 LOS 和 NLOS 路径下, 信道容量随信噪比变化的仿真曲线。图 4 中实线是 COST2100 信道模型的仿真曲线, 虚线为 WINNER 信道模型的仿真曲线。可以得出, 信道容量随

信噪比增加呈增长趋势。在相同天线数量下, LOS 路径下的信道容量略高于 NLOS 路径下的信道容量, 这与理论结果一致。相同信噪比情况下, 天线数量越多, 信道容量越大。两个模型在相同天线数量以及相同参数设置下, 信道容量随信噪比变化的曲线趋势基本一致, COST2100 模型信道容量仿真略高于 WINNER 模型。

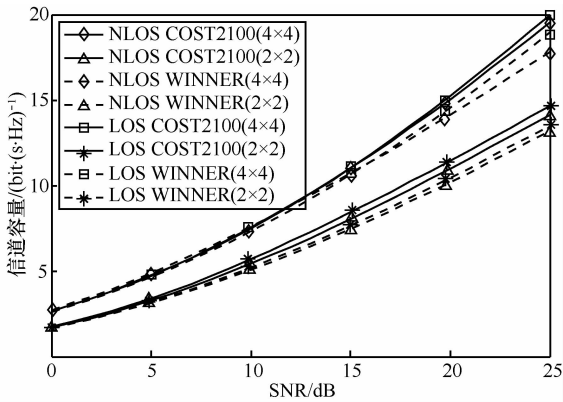


图 4 MIMO 信道容量比较

4.4 均方根时延扩展

宽带多径信道的平均时延和 RDS(RMS delay spread, 均方根时延扩展)可以通过其 PDP 来计算。平均附加时延是 PDP 的一阶矩, 定义如下:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \tag{10}$$

RMS 时延扩展 σ 为 PDP 的二阶矩, 定义如下:

$$\sigma = \sqrt{\tau^2 - \bar{\tau}^2} \tag{11}$$

$$\tau^2 = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)} \tag{12}$$

式(10)~式(12)中, τ_k 表示附加时延, $P(\tau_k)$ 表示 PDP 中 τ_k 对应的功率。

图 5(a) 和图 5(b) 分别是两个模型及测试数据在 LOS 和 NLOS 路径下 RDS 累积分布函数 CDF 的比较。从图 5 中可以看出, 两个模型及测试数据的 RDS 仿真结果在视距和非视距情况下, 分别处于 20~70 ns 和 10~50 ns 中。表 4 和表 5 给出了 RMS 时延扩展的 CDF 曲线在给定概率点的数值。可以看到在 LOS 及 NLOS 场景下, 两个模型及测试数据 RMS 时延扩展在 CDF 50% 处的结果分别为 49 ns 和 30 ns 左右。通过对比可以直观地看到两个模型的结果与测试结果能够很好地匹配。

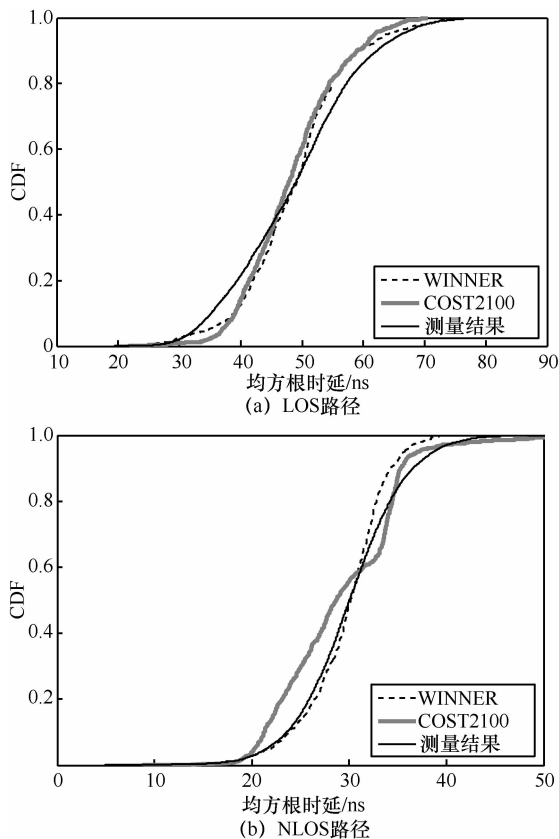


图5 LOS和NLOS路径RDS累计概率密度分布

表4 LOS路径下RMS时延扩展统计值

RDS/ns	COST2100	WINNER	实验结果
10%	39.21	38.83	35.26
50%	47.91	49.19	49.08
90%	59.25	59.44	62.13
平均值	48.30	48.83	48.80
方差	7.78	8.67	10.21

表5 NLOS路径下RMS时延扩展统计值

RDS/ns	COST2100	WINNER	实验结果
10%	21.33	23.18	23.58
50%	28.58	30.14	30.03
90%	35.37	34.45	36.48
平均值	29.17	29.62	30.07
方差	6.41	4.79	5.26

4.5 均方根角度扩展

均方根角度扩展是用来描述空间选择性衰落的重要参数,是由接收端或发射端周围的本地散射体以及远端散射体引起的,它与角度功率谱有关^[21]。类似于均方根时延扩展的定义式,角度扩展等于角度功率谱的二阶中心矩的

平方根,即:

$$\sigma_{AS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (\theta_{n,m,\mu})^2 \cdot \frac{P_{n,m}}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M P_{n,m}}}{N \cdot M}} \quad (13)$$

其中, $\theta_{n,m,\mu}$ 满足:

$$\theta_{n,m,\mu} = \begin{cases} 2\pi + (\theta_{n,m} - \mu_\theta), & (\theta_{n,m} - \mu_\theta) < -\pi \\ (\theta_{n,m} - \mu_\theta), & |(\theta_{n,m} - \mu_\theta)| \leq \pi \\ 2\pi - (\theta_{n,m} - \mu_\theta), & (\theta_{n,m} - \mu_\theta) > \pi \end{cases} \quad (14)$$

$$\mu_\theta = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \theta_{n,m} \cdot \frac{P_{n,m}}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M P_{n,m}}}{N \cdot M} \quad (15)$$

图6是两个模型在NLOS路径下RAS (RMS angle spread, 均方根角度扩展)的CDF比较。由于在LOS路径其RAS和NLOS路径类似,所以图6中只给出非视距RAS的结果。表6给出了LOS和NLOS场景下RAS的CDF在给定概率点的数值。由图6和表6可以看出,在LOS场景下,WINNER模型仿真得到的AOD和AOA分别处于20°~75°和10°~90°中;在NLOS场景下,其AOD和AOA分别处于25°~80°和15°~70°中。在LOS场景下,COST2100模型仿真得到的AOD和AOA分别处于5°~75°和0°~80°中;在NLOS场景下,其AOD和AOA分别处于5°~80°和5°~70°中。两个模型在对应的LOS和NLOS场景下,均方根角度扩展范围吻合较好。

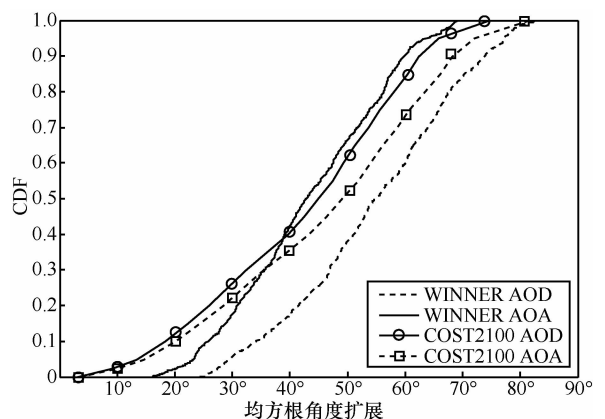


图6 NLOS路径下RAS累计概率密度分布

5 结束语

本文针对室内场景,在LOS和NLOS路径下,对WINNER和COST2100随机信道模型开展了大量仿真和实验对比,研究两个模型的契合度和有效性。研究结果表明,在室内场景下,WINNER和COST2100信道仿真对应

表6 LOS和NLOS路径下RAS统计值

室内场景		COST2100		WINNER	
		LOS	NLOS	LOS	NLOS
AOD	10%	19.48°	20.06°	32.48°	33.94°
	50%	47.59°	48.96°	44.59°	54.41°
	90%	66.33°	68.28°	59.99°	73.40°
	平均值	45.93°	46.31°	44.23°	54.72°
	方差	17.37°	18.13°	13.55°	14.27°
AOA	10%	17.58°	18.08°	26.14°	25.68°
	50%	42.36°	44.51°	45.50°	42.69°
	90%	61.39°	62.34°	69.52°	60.03°
	平均值	41.14°	42.34°	45.47°	43.33°
	方差	15.16°	16.58°	13.68°	12.77°

的PDP、K因子、信道容量、均方根时延扩展、角度扩展等重要的信道参数和特征函数在范围和幅度上都有较好的一致性,从而验证了两个模型在同一场景下的契合度。同时,通过两模型仿真和实测结果的比较验证了模型的有效性。WINNER模型已在信道仿真中得到了广泛应用,本文为COST2100模型的应用提供验证研究的基础。

参考文献:

- [1] 张忠江,刘家康,匡镜明. MIMO无线随机信道模型的仿真[J]. 军民两用技术与产品, 2006(10): 38-39.
ZHANG Z J, LIU J K, KUANG J M. The simulation of MIMO wireless random channel mode [J]. Dual-Use Technologies and Products, 2006(10): 38-39.
- [2] NARANDZIC M, SCHNEIDER C, THOMA R, et al. Comparison of SCM, SCME, and WINNER channel models[C]// The IEEE 65th Vehicular Technology Conference, April 22-25, 2007, Dublin, Ireland. New Jersey: IEEE Press, 2007: 413-417.
- [3] OSSEIRAN A, HARDOUIN E, GOURAUD A, et al. The road to IMT-advanced communication systems: state-of-the-art and innovation areas addressed by the WINNER+ project [J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(6): 38-47.
- [4] MCKENNA P M. Report on the international meetings of the ITU-R working parties 3J, 3Kq 3L, and 3M of radio communication study group 3[J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2005, 47(4): 131-135.
- [5] LIU L, OESTGES C, POUTANEN J, et al. The COST2100 MIMO channel model[J]. IEEE Wireless Communications, 2012, 19(6): 92-99.
- [6] 高凯, 张尔扬. MIMO信道的GBDB模型及其信道容量分析[J]. 通信学报, 2005(12): 56-62.
GAO K, ZHANG E Y. GBDB model and channel capacity of the channel MIMO analysis[J]. Journal of Communication, 2005(12): 56-62.
- [7] 李忻, 聂在平. MIMO信道中衰落信号的空域相关性评估[J]. 电子学报, 2004, 32(12): 1949-1953.
LI X, NIE Z P. Evaluating the spatial correlation of fading signals in MIMO channels[J]. Electronic Journals, 2004, 32(12): 1949-1953.
- [8] 刘蕾蕾, 洪伟. LOS环境下散射体对MIMO信道特性的影响[J]. 通信学报, 2009(2): 65-70.
LIU L L, HONG W. Scatterer LOS environment's influence on the MIMO channel characteristic [J]. Journal of Communication, 2009(2): 65-70.
- [9] ZHANG J, LIU G, ZHANG F, et al. Advanced international communications: emerging challenges to IMT-advanced channel model[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2011, 6(2): 92-100.
- [10] Study on 3D channel model for LTE: 3GPP TR 36.873: 2014[S/OL]. [2014-09-17]. <http://www.3gpp.org>.
- [11] YU Y W, ZHANG J H, SHAFI M, et al. Measurements for 3D channel impulse responses for outdoor-to-infor scenario: capacity predictions for different antenna arrays [C]//The IEEE 26th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC2015), August 30-September 2, 2015, Hong Kong, China. New Jersey: IEEE Press, 2015: 408-413.
- [12] CHENG X, YU B, YANG L, et al. Communicating in the real world: 3D MIMO[J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(4): 136-144.
- [13] MOLISCH A F, ASPLUND H, HEDDERGOTT R, et al. The COST259 directional channel model-part I: overview and methodology[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 5(12): 3421-3433.
- [14] 张会清, 于洪珍, 王普, 等. 矩形隧道中电波多径传播模型的建立及仿真[J]. 电波科学学报, 2008, 23(1): 195-200.



- ZHANG H Q, YU H Z, WANG P, et al. Multipath transmission modeling and simulating of electromagnetic wave in rectangle tunnel[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(1): 195-200.
- [15] MEINILA J, KYOSTI P, JAMSA T, et al. WINNER II Channel Models[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009: 39-92.
- [16] CALCEV G, CHIZHIK D, GORANSSON B, et al. A wideband spatial channel model for system-wide simulations [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(2): 389-403.
- [17] STEINBAUER M, MOLISCH A F, BONEK E. The double-directional radio channel [J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2001, 43(4): 51-63.
- [18] 赵雄文, 李艺伟, COULIBALY B M, 等. 室内宽带多输入多输出抽头时延线新模型研究 [J]. 电波科学学报, 2014(6): 14-57.
- ZHAO X W, LI Y W, COULIBALY B M, et al. A new tapped delay line channel model for indoor wideband MIMO channels[J]. Chinese Journal of Radio Science(in Chinese), 2014(6):14-57.
- [19] GREENSTEIN L J, MICHELSON D G, ERCEG V. Moment-method estimation of the Ricean K-factor [J]. Communications Letters IEEE, 1999, 3(6): 175-176.
- [20] ZHAO X, BALLA M C, LIANG X, et al. Comparisons of channel parameters and models for urban microcells at 2GHz and 5GHz [J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2014,

56(6): 260-276.

- [21] 徐栋梁. 基于 3GPP SCM 的 MIMO 信道建模和信道参数估计[D]. 天津: 天津大学, 2010.

XU D L. Based on the 3GPP SCM MIMO channel modeling and channel parameter estimation [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.

[作者简介]



赵雄文(1964-),男,华北电力大学教授、博士生导师,主要从事 MIMO 无线通信信道模化和实验、无线通信系统、电磁场理论及其应用、频谱管理和干扰协调技术、对流层通信电波传播等研究和教学工作。



高波(1990-),男,华北电力大学通信与信息系统专业硕士生,主要研究方向为无线通信系统中 MIMO 信道模型的仿真与验证。