

2.55 GHz 城市微蜂窝三维宽带时变信道特性分析与建模研究

李树¹, 赵雄文^{1,2,3}, 张蕊², 王琦¹, 耿绥燕¹

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206;

2. 中国电波传播研究所电波环境特性与模化技术国家重点实验室, 山东 青岛 266107;

3. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要: 基于 2.55 GHz 城市微蜂窝场景多输入多输出(MIMO, multiple-input multiple-output)信道实测数据, 研究了三维宽带无线信道的时变特性, 利用 SAGE (space-alternating generalized expectation-maximization)算法提取多径参数, 包括水平、垂直面的电波离开角和电波到达角, 采用双向匹配算法识别并跟踪多径, 建立了多径的“生灭”模型, 统计分析了多径的出现率、多径生命周期、多径初始参数和演进参数等时变信道模型参数并根据上述参数的统计分布和相关性展开建模, 建立了基于多径“生灭”过程的时变信道模型, 并给出了详细的模型参数和仿真实现步骤, 通过对比实测数据和仿真结果的均方根时延扩展和均方根角度扩展, 验证了模型的可用性。提出的时变信道模型可用于城市微蜂窝场景时变信道仿真, 也为 5G 动态信道建模的研究提供重要参考。

关键词: 城市微蜂窝; SAGE; 多径“生灭”模型; 时变信道; 信道仿真与验证; 5G 动态信道建模

中图分类号: TN928

文献标识码: A

Research on characterization and modeling for 3D wideband time-varying channels for urban microcells at 2.55 GHz

LI Shu¹, ZHAO Xiong-wen^{1,2,3}, ZHANG Rui², WANG Qi¹, GENG Sui-yan¹

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

2. National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radio Wave Propagation, Qingdao 266107, China;

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

Abstract: Based on the outdoor microcell MIMO channel measurement campaign at 2.55 GHz, the time-evolution characteristics of three-dimensional wideband channel were studied. The SAGE algorithm was used to extract multipath parameters such as azimuth and elevation angle of departure and arrival. A bidirectional matching algorithm was applied to tracing multipath and the "birth-death" process. The statistical characteristics of multipath birth, lifespan, multipath initial and evolution parameters were analyzed and modeled based on the cross-correlations of multipath parameters. A time-varying channel model with multipath birth-death process was developed. The model parameter table and a detailed flowchart were offered for time-varying channel simulations. The proposed model was validated by comparing the root-mean-square (RMS) of delay spread and angular spread between the simulated and measured results. The channel model proposed can be applied in time-varying channel simulation for urban microcells and it's also very important to be referred in 5G dynamic channel modeling.

Key words: urban microcell, SAGE, multipath birth-death process, time-varying channel, channel simulation and validation, 5G dynamic channel modeling

收稿日期: 2017-01-10; 修回日期: 2017-06-27

通信作者: 赵雄文, zhaowx@ncepu.edu.cn

基金项目: 电波环境特性与模化国家重点实验室开放课题基金资助项目 (No.201400009); 移动通信国家重点实验室开放课题基金资助项目 (No.2016D09); 国家自然科学基金资助项目 (No.61372051)

Foundation Items: Open Fund of National Key Laboratory of Electromagnetic Environment (No.201400009), Open Fund of National Mobile Communications Research Laboratory (No.2016D09), The National Natural Science Foundation of China (No.61372051)

1 引言

在实际的电波传播过程中,随着移动台的运动和周围环境的变化,无线信道通常是非平稳的,即衰落特性和信道参数随时间而改变。为了对无线信道进行统计建模,第三代合作伙伴计划(3GPP, 3rd generation partnership project)空间信道模型(SCM, spatial channel model)^[1]提出了广义平稳(WSS, wide sense stationary)的概念,即假设信道在一小片段距离内是广义平稳的,该距离称为 WSS 窗口长度。这种建模方法被 3GPP SCM^[2]、SCME (SCM extension)^[3]、LTE-A (long-term evolution-advanced)^[4]、WINNER (wireless world initiative new radio)^[5]、WINNER II^[5]、WINNER+^[6]、IMT-A (IMT-advanced)^[7]等国际上形成标准的无线信道模型采用,这些模型都是几何基础上的随机统计模型(GBSM, geometric-based stochastic model),基于这些模型进行信道仿真会出现相邻窗口信道或多用户相邻用户信道不连续的问题。随着第五代(5G)移动通信的到来^[8~11],特别是在 5G 热点地区大量移动散射体的出现,时变信道的研究受到无线信道建模研究领域的广泛关注。事实上,信道的时变特性在 21 世纪初已有不少研究,文献[12]提出基于二状态马尔可夫链的动态室内信道仿真方法,文献[13]基于室内信道测量数据建立了四状态马尔可夫动态模型,文献[14,15]基于空间点过程从理论上分析了时变信道的产生和消亡过程,即多径的生灭特性,文献[16~19]在 GBSM 的基础上进行了时变特性的相关研究,文献[20]基于测量数据展开了车对车时变信道的统计特性研究。此外,文献[21,22]对高速铁路场景中高速移动带来的无线信道时变特性和多径“生灭”以及测量问题展开了相关研究。

然而,文献[12,13]仅针对室内场景展开了时变信道建模工作,所提出的单步马尔可夫动态模型只反映一条多径的“生灭”变化过程,若相邻 2 个采样时刻最多存在 M 条多径的“生灭”变化,则需建立 M 步(M -step)马尔可夫模型。因此,在 M 取值较大时,模型复杂程度高,对参数的描述也很困难。基于 GBSM 的动态模型^[16,19]只适用一些特殊的场景,场景中的散射体分布等往往与实际环境很难匹配。为提高信道模型准确性,必须研究垂直维角度变化特性,需要建立 3D-MIMO 信道模型,而文献[12,15,20]只考虑了电波水平到达角,缺少离

开角和垂直维角度信息。现有文献中还未发现基于实际信道测量的城市微蜂窝场景三维统计时变信道模型。

本文基于 2.55 GHz 城市微蜂窝(UMi, urban microcell)场景大量 3D-MIMO 信道实测数据,利用高分辨率算法 SAGE 提取完整的多径参数集,采用双向匹配算法识别并跟踪多径,建立了多径的“生灭”模型,统计分析了多径的出现率、多径生命周期、多径初始参数和演进参数等时变信道参数,最终建立基于多径“生灭”过程的时变信道模型,并给出了详细的模型参数和仿真实现步骤,通过对比实测和仿真结果的信道大尺度参数均方根时延扩展和均方根角度扩展,验证了模型的可用性。本文借鉴文献[12,13,20]中的部分思路,基于大量实测数据和高分辨率算法统计分析了城市微蜂窝信道时变特性,包括水平和垂直面的离开角和到达角的统计特性和演进特性,建立了城市微蜂窝场景三维时变信道模型,目前,还未发现类似的研究结果。本文提出的时变信道模型可用于城市微蜂窝场景时变信道仿真,对时变信道建模的研究有重要的参考价值。

2 测量环境与测量系统

本文中城市微蜂窝时变信道特性的分析和建模基于芬兰奥卢市区 WINNER II 项目的部分测量数据。信道测试中收发端使用了 2 种 MIMO 天线,发射端采用全向阵列(ODA, omni-directional array)天线,测试使用了其中 48 个双极化天线单元,其离开角水平方位为 $-180^\circ \sim 180^\circ$,垂直方位为 $-70^\circ \sim 90^\circ$;接收端采用 16 单元阵列天线,测试使用了其中 12 个双极化天线单元,其到达角水平方位为 $-70^\circ \sim 70^\circ$,垂直方位为 $-70^\circ \sim 70^\circ$ 。为了建立时变信道的统计模型,本文选取了 2 个基站位置,记为 BS_1 和 BS_2 ,如图 1 所示,每个基站各开展一条视距路径的信道测量工作,分别记为 R_1 和 R_2 。发射端设备置于小车上,作为移动台以 10 km/h 的速度行驶,接收端分别置于 BS_1 和 BS_2 基站位置。水平方向 0° 为基站天线平面的法线方向,如图 1 中箭头方向所示,垂直方向 0° 位于水平面内。基站高度为 8 m,移动台高度为 1.7 m。信道测试采用 Elektrobit 公司的 Propsound 时域信道探测仪,系统参数设置如表 1 所示。系统在时域的采样周期约为 0.42 s,移动台行驶速度为 10 km/h 时,相邻 2 个时间样本,即快

照 (snapshot) 之间距离为 1.17 m。为了建立准确的基于统计的时变信道模型, 本次测量在 BS₁ 和 BS₂ 共采集了 1 700 个快照用于 UMi 场景时变信道建模, 每个快照包括 576 路 MIMO 信道冲激响应数据。路径 R₁ 长度约为 1.2 km, 路径 R₂ 长度约为 0.8 km。

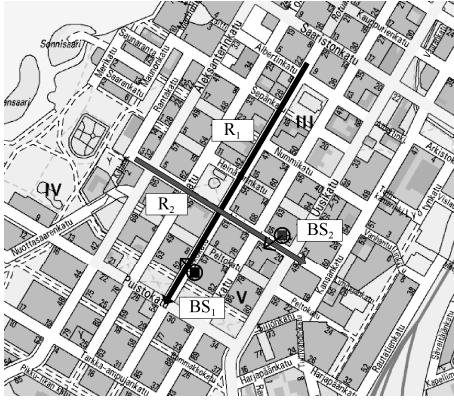


图 1 时变信道测量场景示意

表 1 系统参数设置

参数	数值
载频	2.55 GHz
带宽	200 MHz (null-to-null)
码长	511 chip
时延分辨率	10 ns
最大可测额外时延	5.11 μs
发射/接收天线	ODA / 16 单元平面阵列
极化	交叉极化(±45°)
发射天线高度	1.7 m
接收天线高度	8 m

3 基于统计的时变特性分析和时变信道建模理论

本节提出一种基于统计的时变信道建模理论, 借鉴 WINNER 模型^[5]的思想, 将信道的时变特性描述为多径 (multipath) 的动态变化, 包括其“生灭”过程以及在其生命周期内随时间的演进过程等。多径参数利用高分辨率算法 SAGE 提取得到, 多径的跟踪采用基于多径分量距离的双向匹配算法^[20], 是在相邻快照传承关系的一种可识别多径直观方法。基于大量时间连续快照的多径参数提取跟踪结果, 通过统计方法对时变信道各项特性展开建模。

3.1 基于多径的动态时变模型结构

三维空间下动态方向性宽带信道的冲激响应

可表示为

$$h(t_i, \tau_l(t_i), \Omega_{1l}(t_i), \Omega_{2l}(t_i)) = \sum_{l=1}^{N(t_i)} \alpha_l(t_i) \delta[\tau - \tau_l(t_i), \Omega_1 - \Omega_{1l}(t_i), \Omega_2 - \Omega_{2l}(t_i)] \quad (1)$$

其中, $N(t_i)$ 表示 t_i 时刻存在的多径总数, $\rho_l = [\tau_l, \Omega_{1l}, \Omega_{2l}, \alpha_l]$ 表示第 l 条多径的参数集, τ 表示时延, Ω_1 表示三维离开角, Ω_2 表示三维到达角, α 表示复数幅度值。在时变模型中, 多径参数随时间变化, 因此表示为时刻 t_i 的函数。 $\delta(\cdot)$ 表示狄拉克函数。

随着移动台在环境中的移动, 电波从发端到收端所经历的多径呈现随机的动态变化, 多径可能随机地出现在某一时刻, 然后随机地消失在之后的另一时刻, 即存在多径的“生”和“灭”过程。 t_i 时刻存在的多径可分为在 t_i 时刻首次出现的多径和来自 t_{i-1} 时刻的多径。本文参考文献[20]所述方法, 多径集合可定义为: 1) $L_{i \rightarrow i}$ 表示 t_i 时刻首次出现的多径集合, 记为 $l_{i \rightarrow i} = 1, 2, \dots, N(t_{i \rightarrow i})$; 2) $L_{j \rightarrow i}$ 表示 t_j 时刻首次出现并仍存在于 t_i 时刻的多径集合 ($0 < j < i$), 记为 $l_{j \rightarrow i} = 1, 2, \dots, N(t_{j \rightarrow i})$; 3) L_i 表示 t_i 时刻存在的多径集合, 是之前时刻首次出现并仍存在于 t_i 时刻的多径

集合的并集 $L_i = \bigcup_{j=1}^i L_{j \rightarrow i}$, $l_i = 1, 2, \dots, N(t_i)$, 其中, $N(t_i)$ 为 t_i 时刻存在的多径总数 $N(t_i) = N(t_{i-1}) + \sum_{j=1}^{i-1} N(t_{j \rightarrow i})$ 。通过识别和跟踪所有时刻上述各集合

多径信号, 可建立动态多径“生灭”模型。每条多径通过其参数集 ρ 描述, 在多径的生命周期内, 参数集中的各个参数均是随时间动态变化的, 因此, 需对多径的初始状态和演进行为建模, 就能确定任意时刻下存在的多径总数及每条多径的瞬态参数, 再由式(1)得到信道冲激响应。

3.2 多径参数的提取与动态多径的识别与跟踪

多径参数集 ρ 通过 SAGE 算法提取得到。SAGE 算法是高分辨率信道参数提取算法中的一种, 广泛用于方向性宽带信道特性分析和建模^[23,24]。本项目中, SAGE 算法的最大多径数设为 30 条, 筛选信号动态范围高于 25 dB 的快照用于视距径的多径参数提取^[5]。角度域参数包括水平到达角 (AoA, azimuth-angle of arrival)、水平离开角 (AoD, azimuth-angle of departure)、垂直到达角 (EoA, elevation-angle of arrival) 和垂直离开角 (EoD, eleva-

tion-angle of departure)。

动态多径的识别与跟踪采用基于多径分量距离 (MCD, multipath component distance) 的方法^[25,26]。MCD 描述了多径信号在参数空间的欧氏距离。考察分别属于任意 2 个连续的快照 i 和 $i+1$ 中的多径 l_1 和 l_2 ，其多径参数定义如下

$$\begin{aligned} l_1 \in L_i: & \\ & [\alpha_1(t_i), \tau_1(t_i), \varphi_1^{(1)}(t_i), \theta_1^{(1)}(t_i), \varphi_1^{(2)}(t_i), \theta_1^{(2)}(t_i)] \\ l_2 \in L_{i+1}: & \\ & [\alpha_2(t_{i+1}), \tau_2(t_{i+1}), \varphi_2^{(1)}(t_{i+1}), \theta_2^{(1)}(t_{i+1}), \varphi_2^{(2)}(t_{i+1}), \theta_2^{(2)}(t_{i+1})] \end{aligned} \quad (2)$$

其中， $\varphi^{(1)}$ 和 $\theta^{(1)}$ 表示 AoD 和 EoD； $\varphi^{(2)}$ 和 $\theta^{(2)}$ 表示 AoA 和 EoA； l_1 和 l_2 的 MCD 由式(3)计算。

$$MCD = \left(\frac{1}{\Delta\alpha_{\max}} \left| \frac{\alpha_1(t_i)}{\alpha_2(t_{i+1})} \right| \right) \sqrt{\|MCD_{\Omega_1}\|^2 + \|MCD_{\Omega_2}\|^2 + MCD_{\tau}^2} \quad (3)$$

其中，时延域距离 MCD_{τ} 可表示为

$$MCD_{\tau} = \frac{\tau_{\text{std}}}{\Delta\tau_{\max}^2} |\tau_1(t_i) - \tau_2(t_{i+1})| \quad (4)$$

其中， τ_{std} 是多径集合 $l \in (L_i \cup L_{i+1})$ 中多径时延的标准偏差，且

$$\begin{cases} \Delta\alpha_{\max} = \frac{\max(\alpha_l)}{\min(\alpha_l)} \\ \Delta\tau_{\max} = \max(\tau_l) - \min(\tau_l) \end{cases}, l \in (L_i \cup L_{i+1}) \quad (5)$$

其中，下标 l 代表集合 $(L_i \cup L_{i+1})$ 中的所有多径， α_l 和 τ_l 分别表示多径集合 $(L_i \cup L_{i+1})$ 中多径的幅值和时延。角度域 MCD 分为离开角 MCD_{Ω_1} 和到达角 MCD_{Ω_2} ，分别由式(6)和式(7)给出。

$$MCD_{\Omega_1} = \frac{1}{2} \left(\begin{array}{c} \cos(\theta_1^{(1)}(t_i))\cos(\varphi_1^{(1)}(t_i)) \\ \cos(\theta_1^{(1)}(t_i))\sin(\varphi_1^{(1)}(t_i)) \\ \sin(\theta_1^{(1)}(t_i)) \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \cos(\theta_2^{(1)}(t_{i+1}))\cos(\varphi_2^{(1)}(t_{i+1})) \\ \cos(\theta_2^{(1)}(t_{i+1}))\sin(\varphi_2^{(1)}(t_{i+1})) \\ \sin(\theta_2^{(1)}(t_{i+1})) \end{array} \right) \quad (6)$$

$$MCD_{\Omega_2} = \frac{1}{2} \left(\begin{array}{c} \cos(\theta_1^{(2)}(t_i))\cos(\varphi_1^{(2)}(t_i)) \\ \cos(\theta_1^{(2)}(t_i))\sin(\varphi_1^{(2)}(t_i)) \\ \sin(\theta_1^{(2)}(t_i)) \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \cos(\theta_2^{(2)}(t_{i+1}))\cos(\varphi_2^{(2)}(t_{i+1})) \\ \cos(\theta_2^{(2)}(t_{i+1}))\sin(\varphi_2^{(2)}(t_{i+1})) \\ \sin(\theta_2^{(2)}(t_{i+1})) \end{array} \right) \quad (7)$$

垂直角 $\theta = 0$ 表示水平面方向。

式(3)~式(7)给出了在三维空间下，相邻 2 个快照中任意一对多径之间 MCD 的计算方法。下面通过双向匹配实现多径的跟踪，步骤如下。

1) 首先，计算 L_i 和 L_{i+1} 内每一对多径的 MCD，将结果存放在大小为 $N(t_i)N(t_{i+1})$ 的矩阵 \mathbf{D} 中， $N(t_i)$ 表示 t_i 时刻存在的多径集合 L_i 中的多径总数。

2) 考察任意一对分别来自前一时刻的多径 u 和后一时刻的多径 v ，若有

$$\begin{cases} u = \arg \min (\mathbf{D}_{u \in N(t_i), v}) \\ v = \arg \min (\mathbf{D}_{u, v \in N(t_{i+1})}) \\ \mathbf{D}_{u, v} \leq \varepsilon \end{cases} \quad (8)$$

则将 u 和 v 看作一条多径，分配唯一的多径编号实现配对。式(8)中， ε 是设定的 MCD 阈值。3 个条件含义依次为：前一时刻第 u 条多径和所有后一时刻的多径距离最小；后一时刻第 v 条多径和所有前一时刻的多径距离最小； u 和 v 之间的多径距离在 MCD 阈值以内。这代表在前后 2 个时刻中，找到了一对距离最短的多径，且它们在相邻 2 个时刻的变化在所判定的阈值内，则认为多径 v 继承自多径 u 。考察 L_i 和 L_{i+1} 的每一对多径，按照上述做法对符合要求的多径进行配对。

3) 考察 L_{i+1} 和 L_{i+2} 中的多径，重复第 2) 步。若 t_{i+2} 时刻的第 w 条多径与 t_{i+1} 时刻的第 v 条多径匹配，则 t_{i+2} 时刻的第 w 条多径不再分配多径编号，而是继承 t_{i+1} 时刻的第 v 条多径的编号。

4) 令 $i = i + 1$ ，重复上述步骤。

上述多径跟踪算法从 $i = 1$ 开始执行。在实际环境中，随着移动台的移动，可能出现某些多径由于环境中障碍物遮挡而消失一段时间，随后再度出现的情况。在模型中，这种多径将被定义为若干独立的多径，该假设可在不影响模型精度的前提下简化模型结构。在本次测量中，MCD 阈值选为 $\varepsilon = 0.5$ ，该阈值可有效实现多径的匹配与跟踪，与文献[20, 26]一致。

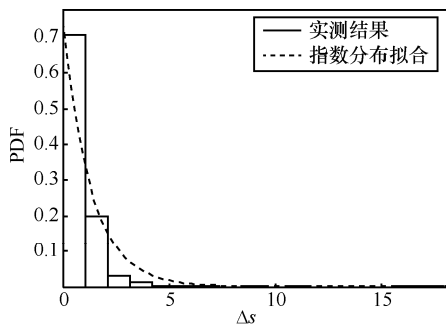
在视距情况下, 多径时延、水平和垂直到达角/离开角和功率均以视距径作为参考进行归一化。即视距径的归一化功率为 0 dB, 归一化时延为 0 ns, 方位角和垂直角归一化为 0°, 这样处理可以简化模型。在仿真过程中, 视距径传播时延、水平方位角以及俯仰角等参数可通过几何方法计算得出, 即在仿真平台输入参数中加入基站和移动台在三维空间的位置、移动台移动路径和速度以及采样时间间隔等参数, 随后根据各个快照时刻下收发端几何位置来计算视距径传播时延和角度域参数, 功率采用自由空间路径损耗模型计算。

3.3 多径的“生灭”过程建模

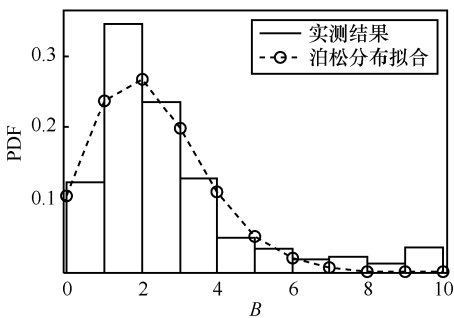
基于多径识别与跟踪的结果, 可对每条多径的生命周期展开统计建模。生命周期 \tilde{T} 可表示为

$$\tilde{T} = T_s \Delta s = (s'' - s' + 1) \quad (9)$$

其中, s' 表示该多径首次出现的快照数, s'' 表示该多径消失的快照数, Δs 表示该多径存在的快照数, T_s 表示系统采样时间间隔, 为 0.42 s, \tilde{T} 和 Δs 可建立一一对应的关系, 均可用于描述多径的生命周期。为了方便起见, 对生命周期的建模选取参数 Δs 。图 2(a) 所示为生命周期 Δs 的概率密度函数 (PDF) 及指数分布拟合结果。由图 2(a) 可见, 多径的生命周期 Δs 和指数分布拟合较好, 故多径生命周期建模为指数分布, 即 $\Delta s \sim E(\lambda_{\Delta s})$, 参数 $\lambda_{\Delta s}$ 如表 2 所示。



(a) 多径生命周期 Δs 的概率密度及指数分布拟合结果



(b) 每个快照新出现的多径数 B 的概率密度函数

图 2 多径“生灭”过程概率分布

在多径的“生灭”过程中, t_i 时刻的多径数满足集合 $L_i = \bigcup_{j=1}^i L_{j \rightarrow i}$ 。因此, 通过对每个时刻新出现的多径数进行建模, 并根据多径生命周期的分布给每个新出现的多径随机分配生命周期, 其消亡时刻可根据其首次出现时刻和生命周期推算, 则可模拟多径的“生灭”过程, 从而得到任意时刻的多径数及每条多径的“生灭”信息, 建立多径“生灭”模型。每个快照新出现的多径数可利用多径跟踪结果统计得到, 其概率密度函数如图 2(b) 所示。统计分析显示, 每个快照新出现的多径数 B 近似服从泊松分布, 即 $B \sim P(\lambda_B)$, 参数 λ_B 如表 2 所示。

3.4 多径的初始参数建模

多径的初始参数包括初始时延、初始 AoA、初始 AoD、初始 EoA、初始 EoD 和初始功率。下面将对这 6 个初始参数展开统计建模。

本文在多径的初始时延和初始角度统计建模前, 首先讨论它们之间的相关性。文献[13]指出, 室内视距(LoS, line-of-sight)信道下多径时延和水平方位角之间有较强的相关性, 这是由于室内环境 LoS 场景下始终存在两条较强的多径, 即直射径和后方墙体的反射径, 非视距(NLoS, non-line-of-sight)场景下二者的相关性降低。大量文献表明, 室外场景多径时延和水平方位角彼此独立^[27~29], 初始时延和初始到达角可建立为相互独立的模型。参数分布的相关性分析通常有 2 种方法, 第一种是观察散点图, 文献[20]采用了该方法, 发现在车对车场景下, 各个角度均存在功率较强的多径, 且多径的时延和角度间不存在明显的关联。第二种是基于互相关系数 ρ , 互相关系数量化了 2 个样本间的线性相关性, 可更准确地描述参数间相关性, 通常认为 $|\rho| < 0.3$ 时为低度相关, $|\rho| > 0.8$ 时为高度相关。本文中, 由于模型涵盖了收发端水平和垂直面角度特性, 参数数量相比文献[13]和文献[20]大幅增加, 故采用互相关系数描述参数间相关性。表 3 为信道参数的相关系数, 统计结果表明, 多径时延和水平/垂直面到达角/离开角间两两相互独立, 符合文献[27~29]对室外信道特性的描述。因此, 多径初始时延和初始角度将建立为相互独立的模型, 结果如图 3 所示。直方图为实测结果, 实线为有尺度参数和位置参数的 t 分布 (t location-scale 分布) 的拟合曲线, 虚线为高斯分布的拟合曲线。可见, 多径的初始 AoA、AoD、EoA、EoD 均和 t location-scale 分布吻合, 故多径

表 2 UMi 场景时变信道参数

时变信道参数	最佳拟合统计分布	参数值	拟合误差标准差
多径生命周期 Δs	指数分布: $\Delta s \sim E(\lambda_{\Delta s})$	$\lambda_{\Delta s} = 0.74$	$\lambda_{\Delta s}: 0.017$
每快照多径出生数 B	泊松分布为 $B \sim P(\lambda_B)$	$\lambda_B = 2.24$	$\lambda_B: 0.063$
多径初始时延 τ	指数分布为 $\tau \sim E(\lambda_\tau)$	$\frac{1}{\lambda_\tau} = 57.7$ ns	$\frac{1}{\lambda_\tau}: 0.50$ ns
多径初始 AoD φ_1	t location-scale $\varphi_1 \sim t(\mu_1, \sigma_1, \nu_1)$	$\mu_1 = 0.31, \sigma_1 = 3.32, \nu_1 = 0.47^\circ$	$\mu_1: 0.041$ $\sigma_1: 0.072$ $\nu_1: 0.006$
多径初始 EoD θ_1	t location-scale: $\theta_1 \sim t(\mu_2, \sigma_2, \nu_2)$	$\mu_2 = 0.54, \sigma_2 = 6.94, \nu_2 = 0.84^\circ$	$\mu_2: 0.058$ $\sigma_2: 0.084$ $\nu_2: 0.019$
多径初始 AoA φ_2	t location-scale: $\varphi_2 \sim t(\mu_3, \sigma_3, \nu_3)$	$\mu_3 = -0.18, \sigma_3 = 1.84, \nu_3 = 0.81^\circ$	$\mu_3: 0.021$ $\sigma_3: 0.038$ $\nu_3: 0.008$
多径初始 EoA θ_2	t location-scale: $\theta_2 \sim t(\mu_4, \sigma_4, \nu_4)$	$\mu_4 = -0.08, \sigma_4 = 2.20, \nu_4 = 0.85^\circ$	$\mu_4: 0.028$ $\sigma_4: 0.033$ $\nu_4: 0.012$
多径初始功率 P	式(11)	$\mu_P = -9.94, \sigma_P = 5.62$ dB $k_{P-\tau} = -0.017$ dB/ns	$\mu_P: 0.049$ $\sigma_P: 0.035$
长周期多径时延变化率 k_τ	正态分布为 $k_\tau \sim N(\mu_\tau, \sigma_\tau)$	$\mu_\tau = -1.50, \sigma_\tau = 3.90$ ns/snapshot	$\mu_\tau: 0.24$ $\sigma_\tau: 0.17$
长周期多径 AoD 变化率 k_{φ_1}	正态分布为 $k_{\varphi_1} \sim N(\mu_{\varphi_1}, \sigma_{\varphi_1})$	$\mu_{\varphi_1} = 2.00, \sigma_{\varphi_1} = 2.07$ rad/snapshot	$\mu_{\varphi_1}: 0.43$ $\sigma_{\varphi_1}: 0.31$
长周期多径 EoD 变化率 k_{θ_1}	正态分布为 $k_{\theta_1} \sim N(\mu_{\theta_1}, \sigma_{\theta_1})$	$\mu_{\theta_1} = 0.13, \sigma_{\theta_1} = 2.00$ rad/snapshot	$\mu_{\theta_1}: 0.036$ $\sigma_{\theta_1}: 0.250$
长周期多径 AoA 变化率 k_{φ_2}	正态分布为 $k_{\varphi_2} \sim N(\mu_{\varphi_2}, \sigma_{\varphi_2})$	$\mu_{\varphi_2} = 0.01, \sigma_{\varphi_2} = 0.15$ rad/snapshot	$\mu_{\varphi_2}: 0.059$ $\sigma_{\varphi_2}: 0.042$
长周期多径 EoA 变化率 k_{θ_2}	正态分布为 $k_{\theta_2} \sim N(\mu_{\theta_2}, \sigma_{\theta_2})$	$\mu_{\theta_2} = -0.03, \sigma_{\theta_2} = 0.51$ rad/snapshot	$\mu_{\theta_2}: 0.085$ $\sigma_{\theta_2}: 0.006$
长周期多径功率变化	式(14)	—	—

初始角度采用 t location-scale 分布建模。 t location-scale 分布的概率密度函数表达式为

$$f(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{\nu+1}{2}\right)}{\sigma\sqrt{\nu\pi}\Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)} \left[\frac{\nu + \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}{\nu} \right]^{-\left(\frac{\nu+1}{2}\right)} \quad (10)$$

式(10)记为 $f(x) \sim t(\mu, \sigma, \nu)$, 其中, $\Gamma(\cdot)$ 是伽马函数, μ 是位置参数(location parameter), σ 是尺度参数(scale parameter), ν 是规模参数(shape parameter), 多径的初始时延 Delay、AoA、AoD、EoA 和 EoD 模型参数如表 3 所示。多径初始时延的概率密度函数如图 4 所示。统计分析表明, 多径的初始时延与指数分布吻合较好, 可表示为 $\tau \sim E(\lambda_\tau)$ 。其模型参数见表 3。

多径的初始功率是基于视距径进行了归一化处理, 即视距径的功率值为 0 dB。统计分析表明, 多径的初始功率(单位为 dB 时)服从正态分布, 如图 5 所示。需要注意的是, 在 WINNER II 模型中, 多径的功率与其时延呈负相关, 而与角度相互独立,

表 3 信道参数的相关系数

参数	相关系数 ρ
Delay vs AoA	0.13
Delay vs AoD	-0.01
Delay vs EoA	0.06
Delay vs EoD	-0.05
AoA vs AoD	0.00
AoA vs EoA	-0.03
AoA vs EoD	0.04
AoD vs EoA	0.02
AoD vs EoD	0.05
EoA vs EoD	0.02

本文中的多径呈现类似规律, 如图 6 所示。实线为初始功率对初始额外时延的线性回归结果, 其斜率为 $k_{P-\tau}$ 。为将多径的初始功率和初始时延的关联性引入模型中, 这里采用一种简单的多径初始功率修正模型为

$$P(\tau) = \min(N(\mu_P, \sigma_P^2), 0)(1 + k_{P-\tau}\tau) \quad (11)$$

其中, 归一化初始功率 P 单位为 dB, 其值恒小于等于 0。 $N(\mu_p, \sigma_p^2)$ 为均值和标准差分别为 μ_p 和 σ_p 的正态分布, 参数 μ_p 和 σ_p 由实测结果拟合得到。多径的初始功率按照分布随机生成后, 按照多径时延 τ 和相关系数 $k_{p-\tau}$ 对其修正。

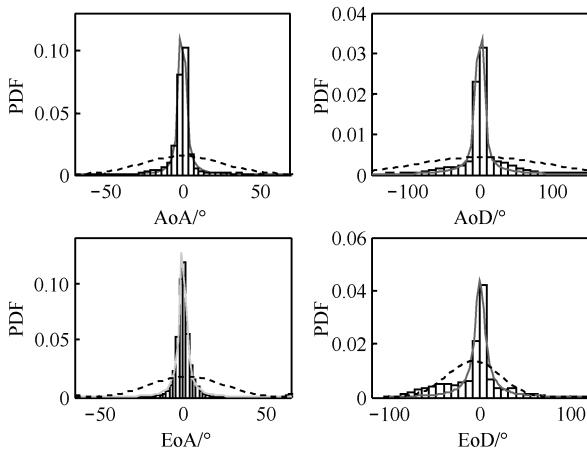


图 3 多径的初始水平/垂直面角度参数概率密度函数及 t location-scale 拟合结果与正态分布拟合结果

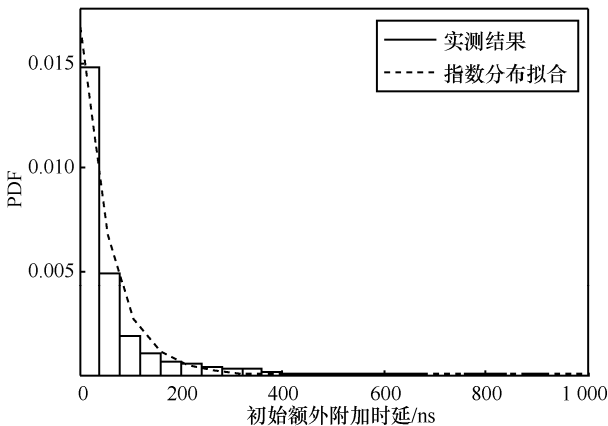


图 4 多径的初始时延概率密度函数及指数分布拟合结果

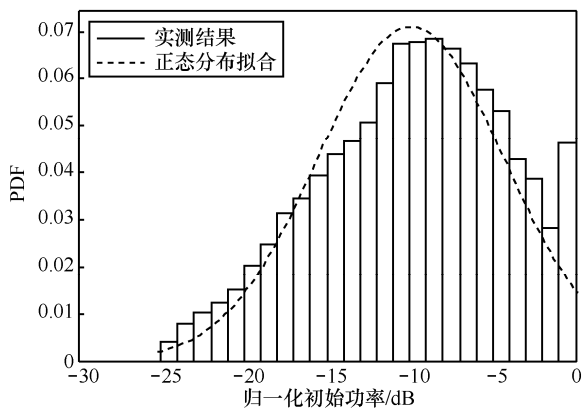


图 5 多径的初始功率概率密度函数及正态分布拟合结果

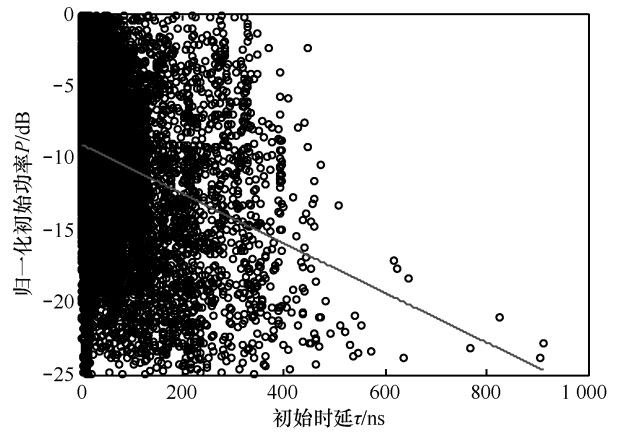


图 6 初始功率对初始额外时延散点和线性回归结果

3.5 多径的时间演进建模

多径的时间演进建模是对多径在其生命周期内参数集 ρ 中各参数的变化展开建模。其中, 多径的时延、AoA、AoD、EoA 和 EoD 的变化体现了多径位置随时间的演进。大量实测数据的统计结果说明, 由于信道测量中移动台大多以匀速直线的方式运动, 多径的上述参数在生命周期内的变化基本呈现线性规律^[12,13,20], 故本文也采用线性回归的方式估计时延域和角度域的演进参数。采用线性回归模型对时间演进建模时, 生命周期较短的多径拟合性能较差, 为提高模型精度, 本文参考文献[20]中的方法, 将多径分为长生命周期和短生命周期多径 2 种。门限值设为 6 个快照, 对应长度约为 7 m, 时长约为 2.5 s。生命周期超过该门限值的多径定义为长生命周期多径, 反之则定义为短生命周期多径。对于长生命周期多径, 将采用线性回归模型对时延域和角度域多径变化情况建模; 对于短生命周期多径, 则假设其角度域和时延域参数在其生命周期里保持不变。

文献[20]中, 将时延和 AoA 的演变过程建模为增大、减少和不变这 3 个等概率事件, 并简单地用均值来代表各个事件中的多径参数的变化规律。这样做能够简化模型, 然而本文测量结果表明, 时延和角度域参数随快照数变化的斜率不服从均匀分布, 而是服从正态分布, 车对车信道和城区微蜂窝信道特性的差异可能会导致这种区别。综上所述, 本文将采用正态分布对时延和角度域参数的演变过程建模, 模型参数见表 2。统计分析结果表明, 长生命周期多径在其生命周期内时延域和角度域的变化相互独立, 因此, 这里单独对时延域和角度域的变化建立演变模型。

多径功率在生命周期内随时间的变化与时延和角度域参数呈现出不同的规律, 随时间推移以波动方式变化, 与文献[13]研究结果相符。WINNER 模型采用随机相位子径叠加来模拟多径信号功率在时间域的变化规律^[5]。由于本文多径参数提取自实测数据, 无需使用类似 SCME 以及 WINNER 的子径模型, 故采用 L-S 周期图 (LSP, lomb-scargle periodogram) 对多径功率在生命周期内的变化建模^[29]。LSP 基于正弦函数的局部最小二乘拟合, 常用于对非均匀间隔的数字信号建模, 可基于实测结果模拟多径功率的波动行为。对于非均匀采样时间序列 x_n , 给定信号 $h_n \equiv h(x_n), n=1, 2, \dots, N$, 归一化 LSP 功率谱密度 $P(\psi)$ 由式(12)求得^[13]。

$$P(\psi) = \frac{1}{2\sigma^2} \left\{ \frac{\left[\sum_{n=1}^N (h_n - \bar{h}) \cos \psi (x_n - \eta) \right]^2}{\sum_{n=1}^N \cos^2 \psi (x_n - \eta)} + \frac{\left[\sum_{n=1}^N (h_n - \bar{h}) \sin \psi (x_n - \eta) \right]^2}{\sum_{n=1}^N \sin^2 \psi (x_n - \eta)} \right\} \quad (12)$$

其中, ψ 代表角频率分量。 \bar{h} 和 σ^2 是数据的均值和方差, η 定义为

$$\tan(2\psi\eta) = \frac{\sum_{n=1}^N \sin 2\psi x_n}{\sum_{n=1}^N \cos 2\psi x_n} \quad (13)$$

文献[13]指出, $P(\psi)$ 实际起到了低通滤波的作用。本文从多径跟踪结果中选取生命周期最长的多径, 利用其功率信号求解 $P(\psi)$ 。模型中的多径功率变化 $P_{\text{path}}(s)$ 则采用如式(14)正弦波叠加模型进行模拟^[12]。

$$P_{\text{path}}(s) = \left| \sum_{n=0}^{N-1} P(n) \exp \left[-j(2\pi n(s-s') + \psi_n) \right] \right|, s \in [s', s''] \quad (14)$$

其中, N 是角度频率分量的个数, 即 $P(\psi)$ 的长度, s' 和 s'' 分别是目标多径“生”和“灭”时刻的快照数, ψ_n 代表初始相位, 假设其在 $[0, 2\pi]$ 服从均匀分布。

4 时变信道模型仿真与验证

利用时变信道模型和 UMi 场景参数 (详见表 2),

可实现时变信道的仿真。本节介绍利用上述时变信道模型进行仿真的具体步骤, 并通过对比实测和仿真信道的时延域和角度域的大尺度参数, 验证本文时变信道模型的可用性。

4.1 时变信道的仿真

利用本文提出的时变信道模型, 可仿真得到任意快照长度多径参数集, 并由式(1)计算方向性宽带信道冲激响应, 编程实现基于 Matlab 平台。本文提出的时变信道模型中, 多径初始参数及演进参数的生成是程序的核心。为表述方便清晰, 将多径的生成用子程序 Birth_Process 实现, 模型仿真实现的流程如图 7 所示。图 7(a)为主程序流程, 图 7(b)为多径生成子程序流程。值得注意的是, 表 2 中的参数是基于视距径的归一化结果。如仿真完整的时变信道冲激响应矩阵, 还需通过场景拓扑定义收发端高度、初始位置、移动台的路径及移动台的移动速度, 并利用几何方法计算每个快照视距径的传播时延和水平/垂直收发角; 视距径的路径损耗可根据自由空间路径损耗模型进行预测。经过上述步骤, 即可将视距径的影响加入到信道模型中, 视距径传播时延和角度的计算可参考 QuaDRiGa 模型^[31]。

作为示例, 图 8 给出了移动台以 10 km/h 的速度匀速沿图 1 中路径 R_1 (长约 1 000 m) 运动时的时变功率时延谱仿真结果, 并与实测结果进行了对比。仿真中基于 WINNER UMi 场景将初始多径数设为 8, 基站位置与移动台路径均按照图 2 中路径 R_1 定义。图 8(a)和图 8(b)分别为实测与仿真结果, 其中, x 轴表示多径的时延, y 轴表示移动台行驶距离, 灰度条表示归一化功率, 仿真中未加入路径损耗的影响。由图 8 可以看出, 仿真和实测结果基本吻合, 仿真得到的视距径的传播时延以及多径的最大额外附加时延与实测结果均保持一致。

4.2 模型的仿真验证

为验证本文时变信道仿真的适用性, 本文对时延域和角度域的大尺度参数即均方根时延扩展, 水平/垂直面离开角和水平/垂直面到达角的均方根角度扩展展开仿真研究并和实测结果进行了比较。仿真快照总数为 5 000, 时延扩展和角度扩展的计算方法可参照 3GPP SCM^[1], 实测和仿真信道的大尺度参数累积分布函数 (CDF) 曲线如图 9 所示。均方根时延扩展(x)和水平/垂直角度扩展单位分别记为 y 与 z , 与 Winner 等^[5]经典 GSCM 模型对应参数

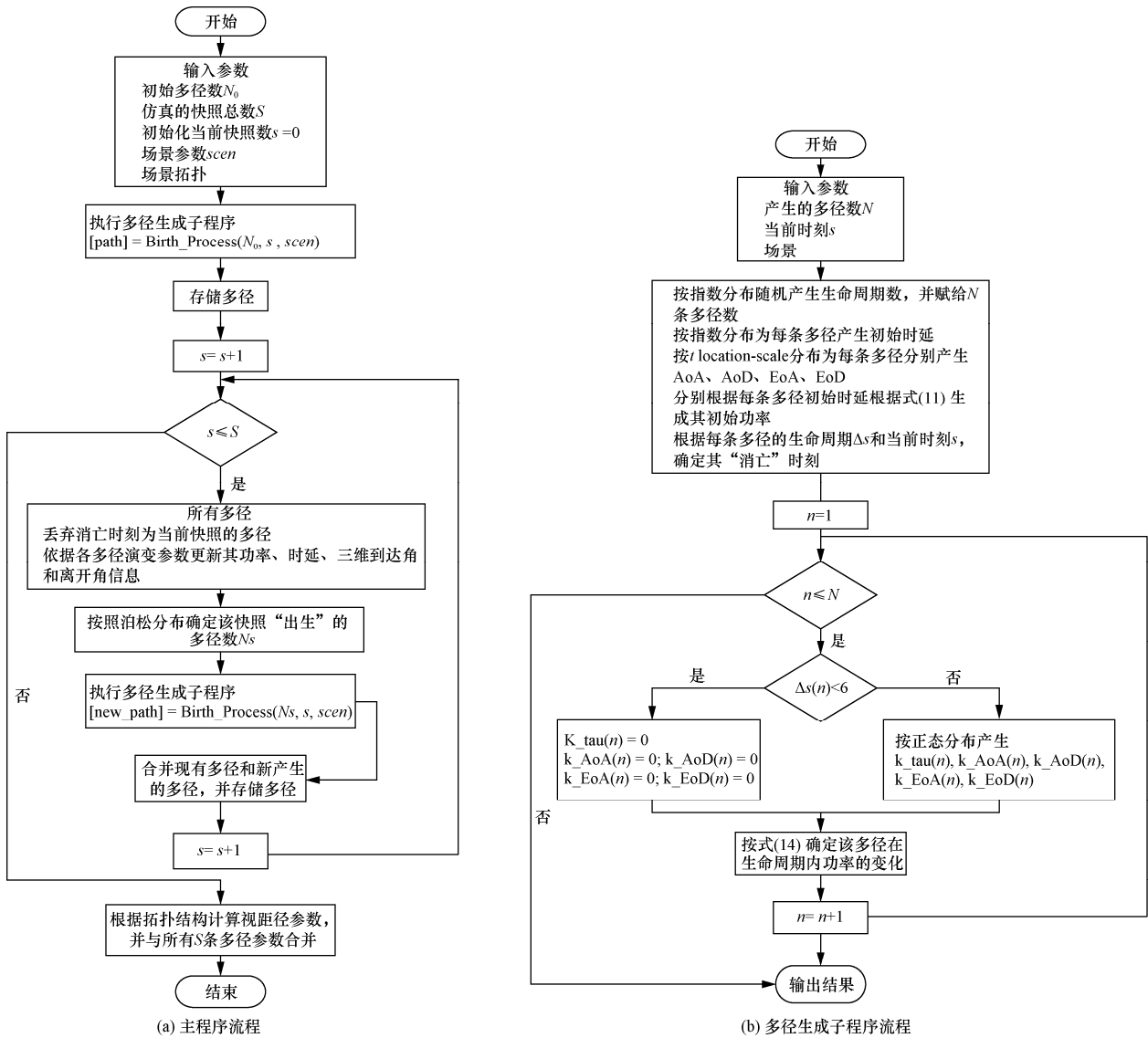


图 7 时变信道仿真流程

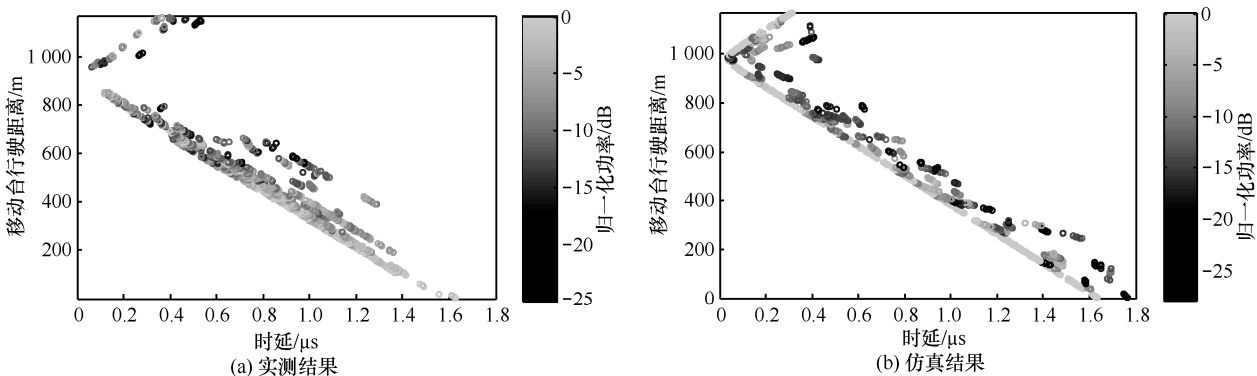


图 8 时变信道距离—功率—时延散布

的量纲一致。由图 9 可以看出, 仿真结果和实测数据分析结果吻合良好, 验证了本文提出的时变信道仿真模型的可用性。

5 结束语

本文基于 2.55 GHz 城市微蜂窝场景大量

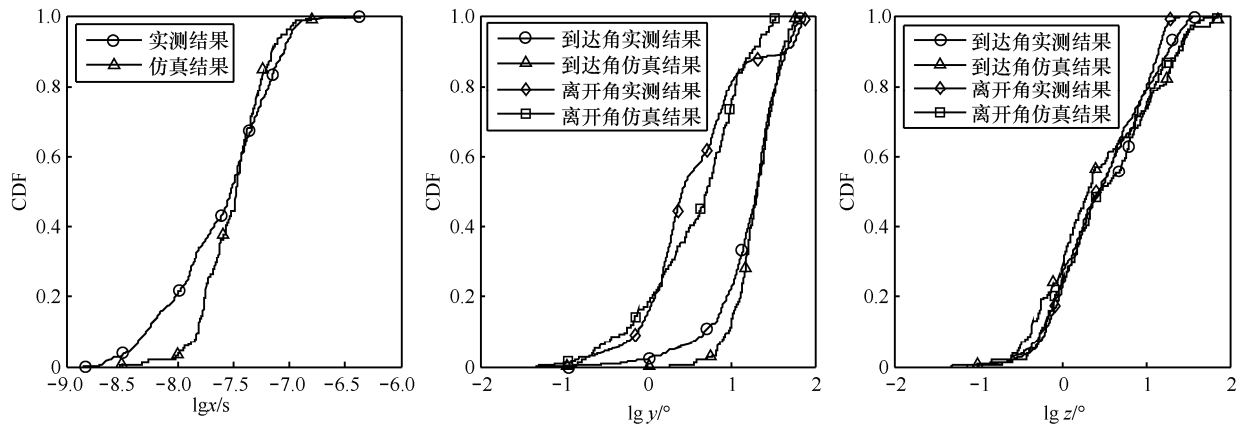


图 9 实测和仿真信道的大尺度参数 CDF 曲线对比

MIMO 实测数据, 利用 SAGE 算法提取多径参数集, 包括水平和垂直面的电波离开角和电波到达角。采用双向匹配算法识别并跟踪多径, 建立多径的“生灭”模型, 统计分析了多径的出现率、多径生命周期、多径初始参数和演进参数等时变信道模型参数, 最终建立基于多径“生灭”过程的时变信道模型。结果表明, 多径的生命周期服从指数分布, 每个快照新出现的多径数服从泊松分布。新出现多径的初始水平和垂直面电波离开角和到达角均服从 t location-scale 分布, 且相互独立; 初始额外附加时延服从指数分布, 初始功率对额外附加时延呈负相关。长生命周期多径在时延域和角度域的演进轨迹建模为线性模型, 其变化率服从正态分布, 功率的变化则采用 L-S 周期图方法构造滤波器, 并利用正弦波叠加模型进行模拟, 短生命周期多径则假设其参数在其生命周期内保持不变。基于建立的时变信道模型, 本文同时研究了信道的仿真实验问题, 通过信道大尺度参数的仿真与实测结果的对比, 验证了模型的可用性。本文提出的时变信道模型可用于城市微蜂窝场景时变信道仿真, 对其他场景和频段移动时变信道特性、模型和仿真研究有较为重要的指导意义。

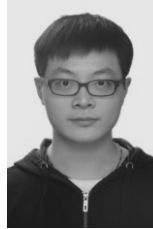
参考文献:

[1] 3GPP. Spatial channel model for multiple input multiple output (MIMO) simulations[R]. TR 25.996 v13.0.0, 2015.
 [2] BAUM D S, HANSEN J, SALO J. An interim channel model for beyond-3G systems: extending the 3GPP spatial channel model (SCM)[C]// 2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference. 2005, 5: 3132-3136.
 [3] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); User equipment (UE) radio transmission and reception (Release 14)[R]. TS 36.101, v14.1.0, 2016.
 [4] BAUM D S, SALLABI H E, JÄMSÄ T, et al. Final report on link

level and system level channel models[R]. IST-2003-507581, WINNER D5.4 v1.4, 2005.
 [5] KYOSTI P, et al. WINNER II channel models[R]. IST-4-027756, WINNER II D1.1.2, v1.2, Apr. 2008.
 [6] MEINILA J, KYOSTI P, HENTILA L, et al. D5.3: Winner+ final channel models[R]. CELTIC/CP5-026, 2010.
 [7] ITU-R M.2135-1, Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced[R]. Geneva, Switzerland, Rep. ITU-R M.2135-1, 2009.
 [8] JÄMSÄ T, KYÖSTI P, KUSUME K. Deliverable d1.2 initial channel models based on measurements[R]. Project Name: Mobile and Wireless Communications Enablers for the Twenty-Two Information Society (METIS), document ICT-317669-METIS/D1.2, 2014.
 [9] AI B, GUAN K, HE R, et al. On indoor millimeter wave massive mimo channels: measurement and simulation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, DOI: 10.1109/JSAC. 2017.2698780.
 [10] RAPPAPORT T S, SUN S, MAYZUS R, et al., Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work![J]. IEEE Access, 2013, 1: 335-349.
 [11] ROH W, SEOL J Y, PARK J, et al. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5 G cellular communications: Theoretical feasibility and prototype results, IEEE Commun Mag, 2014, 52(2): 106-113.
 [12] CHEN Y, DUBEY V K, Dynamic simulation model of indoor wide-band directional channels[J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2006, 55(2): 417-430.
 [13] CHONG C C, TAN C M, LAURENSEN D I, et al. A novel wideband dynamic directional indoor channel model based on a Markov process[J]. IEEE Transaction on Wireless Communication, 2005, 4(4): 1539-1552.
 [14] JAKOBSEN M L, PEDERSEN T, FLEURY B H. Analysis of stochastic radio channels with temporal birth-death dynamics: a marked spatial point process perspective[J]. IEEE Transaction on Antennas Propagation, 2014, 62(7): 3761-3775.
 [15] JAKOBSEN M L, PEDERSEN T, FLEURY B. Simulation of birth-death dynamics in time-variant stochastic radio channels[C]// Zurich Seminar Commun. 2014: 124-127.
 [16] KAREDAL J, TUFVESSON F, CZINK N, et al, Measurement-based modeling of vehicle-to-vehicle MIMO channels[C]//IEEE ICC'09. 2009: 1-6.

- [17] GUAN K, AI B, NICOLAS M L, et al. On the influence of scattering from traffic signs in vehicle-to-X communications[J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2016, 65(8): 5835-5849.
- [18] KNORZER S, BALDAUF M A, FUGEN T, Channel analysis for an OFDM-MISO train communications system using different antennas[C]//IEEE VTC'07-Fall, Baltimore, USA, 2007: 809-813.
- [19] LIANG X, ZHAO X, LI S, et al. A non-stationary geometry-based scattering model for street vehicle-to-vehicle wideband MIMO channels[C]//2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). Hong Kong, 2015: 2239-2243.
- [20] HE R, RENAUDIN D, KOLMONEN V M, et al. A dynamic wide-band directional channel model for vehicle-to-vehicle communications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(12): 7870-7882.
- [21] AI B, GUAN K, RUPP M, et al. Future railway traffic services oriented mobile communications network[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(10): 78-85.
- [22] AI B, CHENG X, KÜRNER T, et al. Challenges toward wireless communications for high-speed railway[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(5): 2143-2158.
- [23] FLEURY B H, TSCHUDIN M, HEDDERGOTT R. Channel parameter estimation in mobile radio environments using the SAGE algorithm[J]. IEEE Journal on Sel Areas in Comm, 1999, 17(3): 434-450.
- [24] 高远. 基于 SAGE 算法的宽带信道参数提取方法的应用研究[D]. 南京邮电大学, 2013.
GAO Y. Parameter estimation for broadband channel system based on SAGE algorithm[D]. Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013.
- [25] STEINBAUER M, OZCELIK H, HOFSTETTER H, et al. How to quantify multipath separation[J]. LEICE Transactions on Electronics, 2002, 85(3):552-55.
- [26] CZINK N, MECKLENBRAUKER C, DEL G G. A novel automatic cluster tracking algorithm[C]//IEEE PIMRC. Helsinki, Finland, USA, 2006: 1-5.
- [27] SPENCER Q H, JEFFS B D, JENSEN M A, et al. Modeling the statistical time and angle of arrival characteristics of an indoor multipath channel[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(3): 347-360.
- [28] HEDDERGOTT R, BEMHARD U P, FLEURY B H. Stochastic radio channel model for advanced indoor mobile communication systems[C]//IEEE PIMRC, Helsinki, Finland, 1997: 140-144.
- [29] SPENCER Q, RICE M, JEFFS B, et al. A statistical model for angle of arrival in indoor multipath propagation[C]//IEEE VTC. Phoenix, USA, 1997: 1415-1419.
- [30] PRESS W H, TEUKOLSKY S A, VETTERLING W T, et al. Numerical recipes in C: the art of scientific computing, 2nd edition[M]. Cambridge, U K: Cambridge Univ Press, 1992.
- [31] JAECKEL S, RASCHKOWSKI L, BÖRNER K, et al, QuaRiGa: a 3-D multi-cell channel model with time evolution for enabling virtual field trials[J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2014, 62(6): 3242-3256.

作者简介:



李树 (1991-), 男, 湖南娄底人, 华北电力大学博士生, 主要研究方向为 3D-MIMO 信道建模、毫米波信道建模、高分辨率提取算法、时变信道建模以及 D2D 通信。



赵雄文 (1964-), 男, 陕西清涧人, 华北电力大学教授、博士生导师, 主要研究方向为 MIMO 无线信道建模和实验、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等。



张蕊 (1979-), 女, 河北正定人, 博士, 中国电波传播研究所高级工程师, 主要研究方向为对流层电波传播、无线信道测量与建模等。



王琦 (1990-), 女, 新疆呼图壁人, 华北电力大学博士生, 主要研究方向为毫米波无线通信、大规模 MIMO 信道建模等。



耿绥燕 (1966-), 女, 陕西绥德人, 华北电力大学副教授, 主要研究方向为短距离通信技术与应用、毫米波 MIMO 无线通信信道实验与建模等。