



中国通信学会
CHINA INSTITUTE
OF COMMUNICATIONS



第一届全国盲信号处理 学术交流会 论文集

中国通信学会国防通信技术委员会
盲信号处理重点实验室 主编



电子科技大学出版社

第一届全国盲信号处理 学术交流会议 论文集

《第一届全国盲信号处理学术交流会议论文集》
编委会

主 任	朱中梁			
副 主 任	郑 辉	孙正波	万 坚	陈晓春
成 员	(排名不分先后)			
	聂幼三	路友荣	罗来源	赵艳秋
	瞿文中	魏合文	廖灿辉	任青圃
	赵 艳	王科人	苑小华	余飞群
	严 航	乔 良	朱珍珍	黄渊凌
	彭华峰	徐正国	包 昕	陈越新
	陈绍贺	刘春国	陆路希	涂世龙
	管 涛			
责任编辑	杨 易	李 龙	杨 铭	
	李智翔	穆晓阳	薄连坤	
封面设计	雷 洋	秦 威	杨 铭	



电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

第一届全国盲信号处理学术交流会论文集 / 中国通信学会国防通信技术委员会盲信号处理重点实验室主编.

—成都: 电子科技大学出版社, 2012. 12

ISBN 978-7-5647-1341-6

I. ①第… II. ①中… III. ①盲信号处理—学术会议—文集 IV. ①TN911.7-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 288237 号

第一届全国盲信号处理学术交流会论文集

中国通信学会国防通信技术委员会
盲信号处理重点实验室 主编

出版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)

策划编辑: 万晓桐

责任编辑: 万晓桐

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 成都蜀通印务有限责任公司

成品尺寸: 185mm×260mm 印张 28.25 字数 705 千字

版 次: 2012 年 12 月第一版

印 次: 2012 年 12 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-5647-1341-6

定 价: 68.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83201495。

◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

前 言

盲信号处理是数字信号处理技术领域中的一个新兴分支，在国内外发展势头十分迅猛，已然成为一个研究热点，在电子信息、通信、雷达、声纳、遥感、噪声控制以及医学成像等领域具有重要的理论以及应用价值。近年来，国内不少研究机构和科研人员出于各自不同的需求牵引，从通信领域的盲信道估计与均衡、盲信源分离，到信号信息盲辨识等多个应用领域，开展了卓有成效的盲信号处理技术研究与实践，取得了不少理论和应用成果。但是，由于国内各家科研机构相互交流不多，彼此间了解还比较少。

为了推动国内盲信号处理领域的学术交流，增进相关科研单位、人员的相互了解，促进该领域的理论研究和科技进步，由中国通信学会国防通信技术委员会主办，盲信号处理重点实验室承办的“第一届全国盲信号处理学术交流研讨会”定于2012年8月在成都召开。会议围绕“盲信号处理”主题，就信号/目标/网络盲检测、信道盲估计、信源盲分离、数据盲恢复技术等相关专题的最新研究进展和发展趋势展开深入、广泛的研讨交流。

本次会议论文征稿通知发出后，得到全国多家科研院所专家和学者来稿响应，会议共收到论文56篇。来稿作者都围绕盲信号处理主题，紧密地把握盲信号处理的理论和技术前沿，从信号信道建模与估计、盲信道信噪比盲估计、盲均衡算法、盲分离、行为模式识别、网络数据流处理等多个角度进行探讨论述。经过专家审查，我们将相关论文汇集成册，论文集分为三部分：第一部分为盲信道估计与信号测向定位；第二部分为盲信号检测与分离；第三部分为盲信号与信息辨识。相关论文选题广泛、观点明确、条理清晰、论述详尽、文字流畅，较好地反映了各位作者在盲信号处理领域的研究进展，具有一定的创新性和较高的学术参考价值。

我们希望通过这些论文的交流，为国内从事盲信号处理相关技术研究的单位和科研人员提供一个互相学习借鉴、取长补短的机会。同时，也期待在我们的共同努力下，将全国盲信号处理学术交流研讨会长期举办下去，打造成盲信号处理同行科研人员间交流情况、研讨技术、寻求合作的平台。

本次会议不足之处，敬请各位专家见谅！

第一届全国盲信号处理学术交流研讨会
论文集编委会
2012年8月

目 录

专 题 一

MIMO 信道相关性建模方法研究	李 明, 刘正军, 丁 亮 (3)
基于循环平稳的盲信干噪比估计算法	高泽忠, 姚富强, 牛英滔, 李永贵, 徐 卓 (11)
基于高阶累积量的盲反卷积均衡器算法的设计实现	吴京苑, 乐宏彦, 张 芋 (20)
一种基于凸代价函数的盲均衡算法	王大磊, 杨 宾, 王 成, 吴 瑛 (28)
信道盲辨识中信道零点与可辨识性关系研究	孙有铭, 刘洛琨, 崔 波, 白曜铭 (36)
低轨卫星频谱采集数据辐射源定位与划分处理技术	姚云枫, 陈雪松, 冷星波 (44)
包含非线性器件的系统级电磁兼容建模方法初探	闫丽萍, 赵 翔, 黄卡玛 (53)
全盲信道估计中小数相位估计	王 旭, 刘 凯, 冯 辉, 胡 波 (60)
一种非均匀子带滤波器组间接设计算法	赵 艳, 万 坚, 王 明 (68)
大尺度电离层倾斜对短波单站定位影响分析	苑小华, 郑 辉, 余飞群 (79)
任意导体面散射问题的三角形单元正弦电流伽略金矩量法	余飞群, 姚山峰, 叶尚福 (86)
高度约束下的信号到达幅度比无源定位方法	曹景敏, 魏合文, 雷 洋, 余 健 (94)
无线传感网络中基于 TOA 定位的时钟误差分析及修正	臧艳红, 王劲松, 凌 琳, 陆佩忠 (104)
双星定位系统中时/频差参数估计方法综述	朱珍珍, 严 航 (114)
基于对流层散射的测向误差分析	李上鹏 (125)
非匀速运动目标的航向分析	张晓勇, 罗来源 (130)
基于天波超视距雷达的无源探测体制研究	贺 青, 杜政东, 姚山峰, 杨宇翔 (138)

专 题 二

基于 ICA-R 的直接序列扩频抗干扰方法	信子君, 胡剑浩 (147)
基于时频分析的跳频信号盲分离	谢 亮, 朱立东 (159)

非合成孔径雷达横向高分辨算法	杨林森, 张子敬, 么晓坤 (166)
基于 MUSIC 方法的稀疏阵列天线通信信号接收方法研究	曹茂国, 王杰令, 王勇超 (172)
非合作照射弱目标回波检测研究	唐世福, 陆振兴, 张雪峰, 朱洪亮 (180)
一种自适应 Goertzel 门限的 DTMF 信号检测方法	胡 敏, 丁益洪, 李赛峰 (187)
基于单通道盲分离的雷达信号分选研究	熊培蕾, 李逸, 张永俊 (193)
基于盲源分离的跳频通信抗跟踪干扰方法	于 淼, 姚富强, 王曰海, 汪国富 (202)
小波降噪在定频信号与阻塞干扰信号盲分离中的应用	汪国富, 陈建忠, 于 淼 (214)
单通道数字调制混合信号盲分离技术研究	迟 松, 徐 蕾, 曹建军, 张宝东 (221)
一种压缩感知的观测矩阵干扰滤波技术	陆路希, 王桂良, 包 昕, 程 建 (227)
信号碰撞对星载 AIS 系统性能的影响分析	廖灿辉, 陈绍贺, 万 坚 (235)
一种基于相位连续性的突发用户分选方法	闫方民, 李 明, 游 凌 (245)
信源信道协同的通信信号单通道盲分离	涂世龙, 廖灿辉 (252)
基于 Duffing 振子的微弱信号检测性能研究	赵 波, 黄 振, 吴文昊, 陆建华 (261)
微弱信号的四阶累积量检测算法研究	肖心龙, 黄 振, 吴文昊, 赵 波, 陆建华 (270)

专 题 三

一种面向网络短文本聚类方法的研究	杨婉霞, 孙理和, 黄永峰 (281)
卫星数字通信单-混信号的调制识别算法	杨 勇, 张冬玲, 彭 华 (292)
基于多峰频差特征的辐射源个体识别方法	郭汉伟, 黄 振, 陆建华 (302)
基于 SVD 和 DCT 的脆弱音频水印算法	黄 莉, 王宏霞 (308)
基于基矩阵散射置信度传播的 QC-LDPC 码最小码间距检测算法	张建军, 董明科, 金 野, 项海格 (318)
社交网络中用户行为模式识别	刘唯一, 于富财, 胡光岷 (328)
基于时频特征分析的 P2P 流识别方法研究	汪明达, 于富财, 文竞成, 胡光岷 (340)
基于深度包检测的无线卫星通信协议盲识别方法	王绍一, 许 珊, 虞红芳, 许 都, 董彬虹 (349)
线性抽样法在形状成像中的应用及改进	赵 翔, 李光华, 闫丽萍, 黄卡玛 (356)
基于排名的异构信息网络分析方法介绍	李智翔 (363)
贝叶斯网络分类概述	穆晓阳 (368)

一种新的视频空域隐藏信息检测算法	王科人 (373)
一种基于 2DLDA 的辐射源个体指纹特征提取方法	刘 建, 万 坚, 郑 辉 (385)
基于移动 agent 的特定信息搜索系统	褚衍杰 (391)
网络损伤条件下的组报技术	陈越新, 郑 辉 (397)
基于自回归条件持续期模型的网络数据流时域微观特性分析	徐正国 (404)
一种基于完全子图分析的重叠社区发现方法	刘 旭, 郑 辉, 易东云 (411)
适应用户兴趣变化的文档推荐	席建民, 俞能海, 郑 辉 (420)
基于 GPU 的 Viterbi 并行译码算法	管 涛, 郑 辉 (430)
论对等网络的安全性	白 峰 (436)

专题一

MIMO 信道相关性建模方法研究

李明¹, 刘正军², 丁亮³

(1. 2. 3. (三部三局) 解放军保密委员会技术安全研究所, 北京 100075)

【摘要】 基于相关性信道建模理论和 3GPP 的空间信道模型, 提出了一种 MIMO 空间信道建模方法。该模型以城市微小区环境为基础, 利用拉普拉斯分布和均匀分布对信道进行建模, 并将 3GPP 开发的信道模型 (SCM) 统计特性应用到数值仿真过程。仿真分析的结果表明, 该模型可较好地反映 MIMO 信道的相关矩阵特性, 适用于实际信道的链路仿真研究, 便于不同环境下信道估计研究和 MIMO 系统的性能评估, 具有较好的可扩展性和实用价值。

【关键词】 多输入多输出 (MIMO); 信道建模; 空间信道模型 (SCM); 相关性

Signal Correlations-based Channel Model for MIMO System

Li Ming¹, Liu Zheng-Jun², Ding Liang³

(1. 2. 3. PLA Secret Technology Research Institute, Beijing, 100075)

Abstract: A new channel model for MIMO (multiple in multiple out), based on signal correlations and 3GPP Space Channel Model, is proposed. Making the urban micro cells as example, this Model is established by using Laplace distribution and Uniform distribution. Then statistical characteristics of the 3GPP space channel model (SCM) are used in simulation of this model. Simulation results show that proposed channel model can give a good expression of the MIMO channel's correlative matrix, and is useful for channel estimation and system evaluation.

Key words: MIMO; channel model; Space Channel Model (SCM); correlation

1 引言

信道模型是进行信道估计的基础, 不同的信道模型对信道估计的实现方法、复杂度起着至关重要的作用。传统的信道模型有 Clarke 模型和 Jakes 模型等经典模型^[1], 这些模型主要是对平坦衰落信道建模, 而且是基于统计的模型, 灵活性差, 未考虑空间角度对信道的影响, 不适用于 MIMO 空间信道的建模。

多输入多输出 (MIMO, Multiple Input Multiple Output) 无线通信系统在空间中使用

多根天线发送和接收信号,因此其信道模型比单输入单输出(SISO, Single Input Single Output)系统复杂得多。由于多根天线位置不同,信号经过 MIMO 空间信道后不仅会产生时间和频率色散,还会造成角度扩展,形成频率选择性衰落、时间选择性衰落和空间选择性衰落。自 Telatar^[2]和 Foschini^[3]发表了有关 MIMO 信道的有关文章以来,广大研究人员和科研机构就对 MIMO 空间信道模型展开大量研究,比较通用的有 3GPP 开发的空时信道模型(SCM)和 ITU 的国际移动通信系统演进(IMT-Advanced)信道模型^[4],其主要区别在于信道大尺度参数之间相关性的计算。这两种模型算法复杂度高,需要考虑的参数因子较多,灵活性较差。

当前,3GPP 以及国内外多个研究机构广泛采用的是基于相关性的信道建模方法,根据 MIMO 空间信道在大多数情况下都具有某种空间相关性的特点,利用天线单元之间的相关性构建 MIMO 空间信道矩阵: $\mathbf{R}_{\text{MIMO}} = \mathbf{R}_{\text{BS}} \otimes \mathbf{R}_{\text{UE}}$ 。即 MIMO 信道相关矩阵 $\mathbf{R}_{\text{MIMO}}$ 可表示为基站端、移动台天线单元之间的相关函数 $\mathbf{R}_{\text{BS}}$ 、 $\mathbf{R}_{\text{UE}}$ 的 Kronecker 乘积^[5]。因此基于相关性的信道模型实现的关键取决于基站与移动台的相关函数。

目前对该方法的研究大多围绕相关性的建立展开,忽略了不同环境空间下信号分布差异和参数差异,构建的信道模型缺乏精确度和参数选取依据。因此,本文提出了以 SCM 统计模型为参数选取依据的针对不同信道环境分别建模的相关性建模方法,并以 MIMO 信道环境复杂的城市微小区为例实现具体算法和仿真,仿真结果表明该方法精确度高,实现灵活,适应用实际信道估计研究。

2 信道模型

2.1 MIMO 信道环境模型

根据 3GPP SCM 信道模型关于城市微小区的规定^[6],构建信道环境模型如图 1 所示。

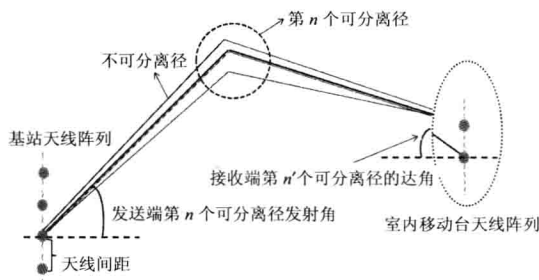


图 1 城市微小区 MIMO 空间信道

假设移动台位于室内,基站位于室外,基站间距小于 1km,基站天线位于屋顶高度,并且基站和移动台的天线全部采用全向天线,天线阵列都是等间距的线性阵列。由于空间环境的散射、反射、折射等原因,基站与移动台之间构成 N 条可分离径,每条可分离径由 M 条不可分离径组成。城市微小区环境的用户位于室内,因此假定移动台天线与基站天线之间不存在直视径,而且 N 条可分离径经过房间的反射、折射后到达室内用户的信号复用均匀分布,且无线信道的包络服从瑞利分布。

2.2 MIMO 信道数学模型

假设基站端配有 N_t 个发射天线, 移动台配有 N_r 个接收天线, 基站天线阵列上的信号可以表示为 $y(t)=[y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t), \dots, y_{N_t}(t)]^T$, 其中 $y_n(t)$ 表示第 n 个发射天线上的信号。移动台天线阵列上的信号为 $r(t)=[r_1(t), r_2(t), \dots, r_{n'}(t), \dots, r_{N_r}(t)]^T$, 其中 $r_{n'}(t)$ 表示第 n' 个接收天线上的信号。则接收信号 $r(t)=\int H(\tau)y(t-\tau)d\tau$ 。

$H(\tau)$ 为连接基站与移动台的信道响应, 可表示为 $H(t)=\sum_{l=1}^L A_l \delta(t-\tau_l)$ 。其中, L 表示 L 条时延多径, A_l 是一个 $N_t \times N_r$ 的复数矩阵, 表述在时延为 τ_l 时所考虑的两个天线阵列之间的线性变换, $A_l = \begin{bmatrix} a_{11}^l & a_{12}^l & \cdots & a_{1N_r}^l \\ a_{21}^l & a_{22}^l & \cdots & a_{2N_r}^l \\ \vdots & \vdots & a_{mn}^l & \vdots \\ a_{N_t1}^l & a_{N_t2}^l & \cdots & a_{N_tN_r}^l \end{bmatrix}_{N_t \times N_r}$, a_{mn}^l 是基站第 m 根天线到移动台第 n

根天线的传输系数。由上式可知, 构建 MIMO 空间信道模型的关键在于获取接近于信道实际特性的传输系数矩阵 A_l 。

假定基站端天线单元之间的相关性与移动台的天线无关, 则基站第 m_1 和 m_2 根天线之间的相关系数可表示为 $\rho_{m_1 m_2}^{BS} = \left\langle |a_{m_1 n}^l|^2, |a_{m_2 n}^l|^2 \right\rangle$, 同理, 移动台天线的相关系数为 $\rho_{n_1 n_2}^{UE} = \left\langle |a_{mn_1}^l|^2, |a_{mn_2}^l|^2 \right\rangle$ 。则基站和移动台各自的相关矩阵可表示为

$$\mathbf{R}_{BS} = \begin{bmatrix} \rho_{11}^{BS} & \rho_{12}^{BS} & \cdots & \rho_{1N_t}^{BS} \\ \rho_{21}^{BS} & \rho_{22}^{BS} & \cdots & \rho_{2N_t}^{BS} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \rho_{N_t1}^{BS} & \rho_{N_t2}^{BS} & \cdots & \rho_{N_tN_t}^{BS} \end{bmatrix}_{N_t \times N_t}, \quad \mathbf{R}_{UE} = \begin{bmatrix} \rho_{11}^{UE} & \rho_{12}^{UE} & \cdots & \rho_{1N_r}^{UE} \\ \rho_{21}^{UE} & \rho_{22}^{UE} & \cdots & \rho_{2N_r}^{UE} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \rho_{N_r1}^{UE} & \rho_{N_r2}^{UE} & \cdots & \rho_{N_rN_r}^{UE} \end{bmatrix}_{N_r \times N_r}$$

利用公式 $\mathbf{R}_{MIMO} = \mathbf{R}_{BS} \otimes \mathbf{R}_{UE}$ 即可获得基站天线与移动台天线之间的相关系数矩阵。由于该相关系数矩阵反映了 MIMO 空间信道的传输特性, 因此可将其用作信道传输矩阵 A_l 。

3 城市微小区 MIMO 信道建模方法

第 2 节中的所述的通用模型将获取 MIMO 空间信道相关系数简化为求解基站和移动台各自的相关矩阵。因此 MIMO 信道建模的关键在于构建适应于实际环境的天线相关矩阵。本文根据城市微小区基站和移动台的分布特点, 假设移动台附近的功率谱服从均匀分布, 基站端服从拉普拉斯分布, 算法实现过程如下。

3.1 均匀分布的 PAS (角度功率谱密度)

设天线阵列均匀分布, N 为可分离径数量, M 为不可分离径数量, $\theta_{n, AOA}$ 为第 n 条可分离径的平均发射角, $\Delta\theta_{n, AOA}$ 表示不可分离径相对于 $\theta_{n, AOA}$ 的发射角, 即平均角度扩展。

则多径均匀分布的 PAS 可表示为

$$\text{PAS}_U(\theta) = \sum_{n=1}^N G_{U,n} \begin{cases} \varepsilon[\theta - (\theta_{n,AOA} - \Delta\theta_{n,AOA})] \\ -\varepsilon[\theta - (\theta_{n,AOA} + \Delta\theta_{n,AOA})] \end{cases}$$

其中, $\varepsilon(\theta)$ 为阶跃函数, $G_{U,n}$ 为第 n 条可分离径的平均功率, 由于多个可分离径的功率是不平衡的问题, 为计算方便将 $G_{U,n}$ 进行归一化设计: $\int_{-\pi}^{\pi} \text{PAS}_U(\theta) d\theta = \sum_{n=1}^N \int_{\theta_{n,AOA}-\Delta\theta_{n,AOA}}^{\theta_{n,AOA}+\Delta\theta_{n,AOA}} G_{U,n} d\theta$,

$$\text{则 } 2 \sum_{n=1}^N G_{U,n} \Delta\theta_{n,AOA} = 1。$$

令 $D = 2\pi d/\lambda$, 其中 d 为天线单元间实际距离, λ 为工作波长, d/λ 表示天线的归一化距离。由此可以推出相隔距离为 d 的两根全向天线接收到的复数基带信号的实部和虚部的互相关函数。两个实部间相关函数可写成

$$R_{XX}(D) = \int_{-\pi}^{\pi} \cos(D \sin \theta) \text{PAS}(\theta) d\theta$$

当为均匀分布时, 上式积分可写成

$$R_{XX,U}(D) = J_0(D) + 4 \sum_{n=1}^N G_{U,n} \sum_{m=1}^M \frac{J_{2m}(D)}{2m} \cos(2m\theta_{n,AOA}) \sin(2m\Delta\theta_{n,AOA})$$

其中, $J_m(\cdot)$ 为第一类第 m 阶贝塞尔函数。两个虚部之间的相关函数与此类同。另外, 实部和虚部之间的互相关函数定义为

$$R_{XY}(D) = \int_{-\pi}^{\pi} \sin(D \sin \theta) \text{PAS}(\theta) d\theta$$

当为均匀分布时, 上式可写为

$$R_{XY,U}(D) = 4 \sum_{n=1}^N G_{U,n} \times \sum_{m=0}^M \frac{J_{2m+1}(D)}{2m+1} \sin[(2m+1)\theta_{n,AOA}] \sin[(2m+1)\Delta\theta_{n,AOA}]$$

3.2 拉普拉斯分布 PAS

拉布拉斯分布被认为是与城区、乡村的信道测量结果吻合得最好的一种分布, PAS 可表示为

$$\begin{aligned} \text{PAS}_L(\theta) &= \sum_{n=1}^N \frac{G_{L,n}}{\sqrt{2}\sigma_{L,n}} \exp\left[-\frac{\sqrt{2}|\theta - \theta_{n,AOA}|}{\sigma_{L,n}}\right] \\ &\times \left\{ \varepsilon[\theta - (\theta_{n,AOA} - \Delta\theta_{n,AOA})] - \varepsilon[\theta - (\theta_{n,AOA} + \Delta\theta_{n,AOA})] \right\} \end{aligned}$$

归一化条件下由下式给出

$$\sum_{n=1}^N G_{L,n} \left[1 - \exp\left(-\frac{\sqrt{2}\Delta\theta_{n,AOA}}{\sigma_{L,n}}\right) \right] = 1$$

其相关函数为

$$\begin{aligned}
R_{XX,L}(D) &= J_0(D) + 4 \sum_{n=1}^N \frac{G_{L,n}}{\sqrt{2}\sigma_{L,n}} \sum_{m=1}^M \frac{J_{2m}(D)}{\left(\frac{\sqrt{2}}{\sigma_{L,n}}\right)^2 + (2m)^2} \cos(2m\theta_{n,AOA}) \\
&\quad \times \left\{ \frac{\sqrt{2}}{\sigma_{L,n}} + \exp\left(-\frac{\sqrt{2}\Delta\theta_{n,AOA}}{\sigma_{L,n}}\right) \left[2m \sin(2m\Delta\theta_{n,AOA}) - \frac{\sqrt{2}}{\sigma_{L,n}} \cos(2m\Delta\theta_{n,AOA}) \right] \right\} \\
R_{XY,L}(D) &= 4 \sum_{n=1}^N \frac{G_{L,n}}{\sqrt{2}\sigma_{L,n}} \sum_{m=1}^M \frac{J_{2m+1}(D)}{\left(\frac{\sqrt{2}}{\sigma_{L,n}}\right)^2 + (2m+1)^2} \sin[(2m+1)\theta_{n,AOA}] \\
&\quad \times \left\{ \frac{\sqrt{2}}{\sigma_{L,n}} - \exp\left(-\frac{\sqrt{2}\Delta\theta_{n,AOA}}{\sigma_{L,n}}\right) \left[(2m+1) \sin[2m+1\Delta\theta_{n,AOA}] + \frac{\sqrt{2}}{\sigma_{L,n}} \cos[(2m+1)\Delta\theta_{n,AOA}] \right] \right\}
\end{aligned}$$

3.3 信道建模及数值仿真

根据 3GPP 发布的 SCM 信道模型规定设置城市微小区场景参数如表 1 所述。

表 1 城市微小区环境参数设置

	基站	用户
发射天线 N_t	4	
接收天线 N_r		2
可分离径 N	6	6
不可分离径 M	20	20
基站各路径发射角分布 $\theta_{n,AOA}$	$(-40^\circ \sim 40^\circ)$	
基站各路径角度扩展 $\Delta\theta_{n,AOA}$	5°	
移动台各路径角度扩展 $\Delta\theta_{n,AOA}$		35°
归一化距离 d/λ	0.5	0.5

3.3.1 SCM 模型信道系数表达式

根据文献[6]中关于 SCM 模型的分析,第 t 时刻,第 n 条多径分量、从第 s 个发射天线到第 u 个接收天线的信道系数由下式产生:

$$\begin{aligned}
h_{u,s,n}(t) &= \sqrt{\frac{P_n \sigma_{SF}}{M}} \\
&\quad \times \sum_{m=1}^M \left(\begin{aligned} &\sqrt{G_{BS}(\theta_{n,m,AoD})} \exp(j(kd_s \sin(\theta_{n,m,AoD}) + \Phi_{n,m})) \\ &\times \sqrt{G_{BS}(\theta_{n,m,AoA})} \exp(j(kd_u \sin(\theta_{n,m,AoA}))) \\ &\times \exp(jk\|v\| \cos(\theta_{n,m,AoA} - \theta_v)t) \end{aligned} \right)
\end{aligned}$$

其中, P_n 为 N 个多径分量的平均随机功率, σ_{SF} 为阴影衰落标准差, $k = 2\pi/\lambda$, d_s 为第 s 个发射天线到第 1 个发射天线的距离, d_u 为第 u 个接收天线到第 1 个接收天线的距离,

其余参数设置同表 1。

3.3.2 相关性建模信道系数表达式

根据接收信号的包络相关系数 ($\rho_e(D)$) 和场强相关系数 ($\rho_f(D)$) 定义^[7]得到相关系数表达式: $\rho_e(D) = |\rho_f(D)|^2 = |R_{XX}(D) + jR_{XY}(D)|^2$ 将 3.1、3.2 节中移动台和基站的相关函数代入即可得到各自的相关矩阵, 参数设置同表 1。

3.3.3 相关性建模数值仿真结果

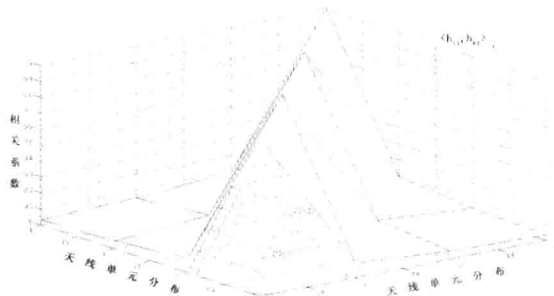


图 2 基站端天线单元相关系数 ($\langle h_{11}, h_{kl} \rangle$)

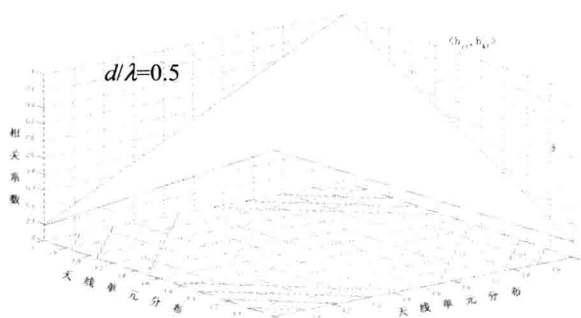


图 3 移动台天线单元相关系数 ($\langle h_{11}, h^{kl} \rangle$)

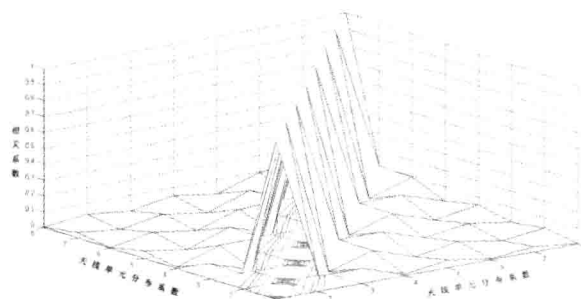


图 4 基站端到移动台相关系数矩阵包络图

图 2、图 3 分别建立的是基站端和移动台第一根天线到其他天线单元的各自相关系数矩阵, 从图中可以看出相邻两个天线单元之间的相关性较强, 相距最远的天线之间相关性最小。图 4 是基于相关性建立的 MIMO 信道基站到移动台 (即下行链路时) 的相关系数矩阵, 具体参数为

$$\begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0960 & 0.0501 & 0.0338 & \cdots & 0.0042 \\ 0.0960 & 1.0000 & 0.0960 & 0.0501 & \cdots & 0.0062 \\ 0.0501 & 0.0960 & 1.0000 & 0.0960 & \cdots & 0.0118 \\ 0.0338 & 0.0501 & 0.0960 & 1.0000 & \cdots & 0.0338 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix}$$

而移动台到基站（即上行链路时）的相关系数矩阵参数为

$$\begin{bmatrix} 1.0000 & 0.1230 & 0.0960 & 0.0118 & \cdots & 0.0042 \\ 0.1230 & 1.0000 & 0.0118 & 0.0960 & \cdots & 0.0338 \\ 0.0960 & 0.0118 & 1.0000 & 0.1230 & \cdots & 0.0062 \\ 0.0118 & 0.0960 & 0.1230 & 1.0000 & \cdots & 0.0501 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix}$$

由此仿真结果可以看出信道相关系数矩阵不仅与移动台和基站各自的分布有关，还与信号发射和接收的方向有关。

以移动台均匀分布的相关系数矩阵为例，分别取不同的天线归一化距离 d/λ ，得到以下结果：

$$\begin{array}{cc} d/\lambda = 0.5 & d/\lambda = 0 \\ \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.1230 \\ 0.1230 & 1.0000 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1.0000 & 1.0000 \\ 1.0000 & 1.0000 \end{bmatrix} \\ \\ d/\lambda = 1 & d/\lambda = 10 \\ \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0627 \\ 0.0627 & 1.0000 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0063 \\ 0.0063 & 1.0000 \end{bmatrix} \end{array}$$

由结果可知，当归一化距离较小时，天线单元可以看做一根天线，天线间的相关性近似等于 1，而随着归一化距离的增大，天线单元间相关性逐渐减小，各天线之间趋于不相关。

因此信道的相关性与基站和用户的天线数、分布方式、所处环境和天线间距等多种因素有关，而且每种因素对信道相关系数矩阵的影响程度也不相同。因此可以根据实际仿真环境灵活调整参数设置，获得最接近实际环境的链路仿真结果。

4 结语

本文建立的 MIMO 信道仿真方法结合了 SCM 信道模型的统计特性和基于相关性的信道建模方法，较好地将 SCM 扩展应用到 MIMO 链路仿真中。根据 3.3.1 节中 SCM 信道系数公式和 3.3.2 的基于相关性的信道系数公式对比可以看出，本文的建模算法复杂度低，所需参数较少，且容易根据实际环境灵活配置。因此可以将该方法应用于 LTE 等应用场景复杂多变、传输速率高的 MIMO 系统中，为信道估计提供更精确的信道模型，有利于降低估计时延和估计复杂度，并为 MIMO 系统在不同场景下的应用提供更加全面的评估。

参考文献

- [1] Matthias Patzold. Mobile Fading Channels. 陈伟 译, 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [2] Telatar IE. Capacity of multi-antenna gauss channels [J]. European Transactions on Telecommunications, 1999, 10 (6) . 585-595.
- [3] Foschini G J and M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. Wireless Personal Communications, 1998, 6 (3): 311-335.
- [4] Stefania Sesia, Issam Toufik and Matthew Baker. LTE-The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice, John Wiley and Sons, 2009
- [5] Pedersen K I and et al. A stochastic multiple-input multiple-output radio channel model for evaluation of space-time coding algorithms[C]. IEEE Vehicular Technology Conference, Boston, MA, USA, 2000 (1): 893-897.
- [6] 邱玲. 多用户、多小区 MIMO 通信技术. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [7] 康桂华. MIMO 无线通信原理及应用. 北京: 电子工业出版社, 2009.

作者简介

李明, 三部三局工程师, 移动通信专业, 在读博士

刘正军, 三部三局高级工程师, 移动通信专业, 博士

丁亮, 三部三局工程师, 通信与计算机专业, 硕士