

室内毫米波 3D-MIMO 无线信道参数提取与多径簇特性研究

廖 希^{1,2}, 黄晨曦¹, 王 洋¹, 车延庭³

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096;
3. 中国电子科技集团公司第二十九研究所电子信息控制重点实验室, 四川成都 610036)

摘 要: 针对室内多用户场景毫米波三维多输入多输出(Three Dimensional Multiple Input Multiple Output, 3D-MIMO)无线信道测量不足、多径簇特性描述不完善的问题, 本文基于测量研究室内毫米波 3D-MIMO 无线信道的参数提取算法和多径簇特性. 首先, 对室内多径传播条件下部署三个用户, 开展了基于虚拟阵列的不同天线阵列大小的无线信道频域测量; 然后, 针对频域空间交替广义期望最大化(Frequency Domain Space-Alternating Generalized Expectation Maximization, FD-SAGE)算法不能描述 3D-MIMO 信道垂直角度特性, 以及时延分辨率不足的问题, 改进算法增加了垂直维度, 并且利用参数优先级迭代方法, 提升毫米波 3D-MIMO 信道的时延域参数提取性能. 结果表明改进算法既能准确地提取出毫米波 3D-MIMO 信道参数, 又能实现随阵列大小增加而增加的多径簇内时延分辨率.

关键词: 毫米波 3D-MIMO; 非视距传播; 信道测量; 参数提取; 多径分簇; 高分辨率

中图分类号: TN928

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)11-2698-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20211490

Research on Indoor Millimeter Wave 3D-MIMO Wireless Channel Parameter Extraction and Multipath Cluster Characteristics

LIAO Xi^{1,2}, HUANG Chen-xi¹, WANG Yang¹, CHE Yan-ting³

(1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;
2. State Key Laboratory of Millimeter Wave, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;
3. Key Laboratory of Electronic Information Control, 29th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu, Sichuan 610036, China)

Abstract: Aiming at the problems of insufficient measurement of three dimensional multiple input multiple output (3D-MIMO) wireless channel and incomplete description of multipath cluster characteristics in indoor multi-user scenarios, parameter extraction algorithm and multipath cluster characteristics of indoor millimeter wave 3D-MIMO wireless channel are studied based on measurement. Three users are deployed in indoor multipath propagation, and wireless channel frequency domain measurements of different antenna array sizes based on virtual array are carried out. The problem that the frequency domain alternating generalized expectation maximization(FD-SAGE) algorithm cannot describe the vertical angular characteristics of 3D-MIMO channel and the delay resolution is insufficient. Improved algorithm adds the vertical dimension, and uses the iterative method of parameter priority to improve the delay domain performance of parameter extraction in millimeter wave 3D-MIMO channel. The results show that the improved algorithm can not only extract millimeter wave 3D-MIMO channel parameters accurately, but also achieve the time-delay resolution in multipath cluster with the increase of array size.

Key words: millimeter wave 3D-MIMO; non-line-of-sight propagation; channel measurement; parameter extraction; multipath clustering; high resolution

1 引言

在室内热点场景中,通过部署三维(Three Dimensions, 3D)多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)天线阵列,能够充分利用三维空间维度有效地提升网络容量^[1]. 在典型室内高容量热点场景中,如商场、办公楼、室内体育场,用户设备呈现出 3D 分布特点. 毫米波与 3D-MIMO 技术的结合在室内热点场景传输容量提升方面具有巨大潜能. 然而,由于毫米波 3D-MIMO 阵列信号的球面波特性和信号传输衰减明显,使用大宽带传输时延分辨率较高,因此显示出无线信道的空-时非平稳、多径分簇、空间相关等新特性^[2]. 开展毫米波 3D-MIMO 无线信道测量与多径分簇研究是信道建模的前提,更是室内小蜂窝网络规划优化的基础. 此外,在毫米波无线信道视距(Line of Sight, LoS)和非视距(Non Line of Sight, NLoS)传播的研究中发现,多径传播通常发生在室内蜂窝场景中,由于复杂的建筑结构阻碍了收发机间信号的直接传输,降低了路径参数提取的精度,进一步影响了毫米波 3D-MIMO 无线信道建模的准确性. 由此可见,研究毫米波频段多径传播无线信道参数估计和簇路径识别是十分必要的^[3].

目前,针对二维角度与三维空间角度时延联合估计分为三大类:谱估计^[4,5]、基于参数子空间的估计^[6,7]、确定性参数估计^[8,9]. Schmidt 等^[4]提出的多重信号分类算法很大程度上提高了角度分辨率,但因对相干信号子空间秩的高敏感性,需要进行去相干处理. Paulraj 等^[7]提出了旋转不变子空间算法,该算法仅适用于特定的天线阵列,应用场景受限. Fleury 提出的空间交替广义期望最大(Space-Alternating Generalized Expectation Maximization, SAGE)化算法^[9]是目前广泛用于估计不同频段、不同场景和不同传播条件下多径信道复幅度、离开角、到达角和时延等路径参数的算法. 文献[10]研究了 SAGE 算法处理下的时延扩展、角度扩展、参数相关性等信道特性. 文献[11]在迭代搜索过程中使角度计算先于时延计算的方法,改进了 SAGE 算法的最大化步骤,提高了时延估计的准确率. 文献[12]通过引入稀疏先验的多径分量增益,提出了稀疏变分贝叶斯 SAGE 算法,进一步提升了角度估计的分辨率. 文献[13]提出了一种适用于均匀圆阵的高分辨参数估计算法,该算法利用时域先验信道信息,有效地消除干扰以及减少搜索空间,进一步地获得球形信道传播参数的高分辨率估计结果. 文献[14]采用串行干扰消除技术(Serial Interference Cancellation, SIC)替代 SAGE 算法中的并行干扰消除技术,提出了频域 SAGE 算法,提升了多径复幅度、时延、水平到达角(Azimuth of Arrival, AoA)估计的准确度. 随后,文献[15]使用频域 SAGE 算法估计了水平离开角(Azimuth of Departure,

AoD),但仍未充分考虑三维空间角度. 针对此问题,文献[16]提出了三维频域 SAGE(Three Dimensional Frequency Domain SAGE, 3D-FD-SAGE)算法,估计垂直到达角(Elevation Angle of Arrival, EAoA)和垂直离开角(Elevation Angle of Departure, EAoD),实现了时延和三维空间角度的联合估计,满足无线通信系统对复杂环境下多径参数的需求.

尽管上述结果研究了多径参数提取算法及无线信道特性,但是因缺乏室内复杂环境下多用户毫米波 3D-MIMO 无线信道的测量数据,多径参数的分簇特性研究还不足. 为此,本文基于室内毫米波 3D-MIMO 无线信道测量,提出改进的 FD-SAGE 算法,研究了不同阵列下多径簇的路径数、时延、角度扩展特性.

2 测量环境与测量系统

本文在重庆邮电大学南部校区综合实验楼内的阶梯会议室中进行了毫米波 3D-MIMO 无线信道的实地测量. 阶梯会议室的几何尺寸为长 22.72 m×宽 13.08 m×高 3 m,室内含有混凝土墙壁、木制门、滑动玻璃窗、教学投影仪以及若干桌椅,室内环境及测量部署方案如图 1(a)所示. 为了得到室内复杂环境中 3D 分布用户的三维空间角度信息,本文测量了三个用户(User Experience, UE)位置的传播信道,分别记为用户 1(UE1),用户 2(UE2)和用户 3(UE3),UE1 和 UE2 与发射端(Transmit, Tx)阵列中心 O 的垂直距离均为 4.45 m,水平距离分别为 1.32 m 和 2.64 m,UE3 处于 UE1 正上方 0.24 m 处,如图 1(a)所示. 为了避免天花板和地面对电波传播的影响,Tx 中心和接收端(Receive, Rx)天线离参考地面的高度分别设置为 0.92 m 和 1.07 m. 实际测试场景如图 1(b)所示.

信道测量采用是德科技公司 VNA(Vector Net Analyzer),其两个端口分别连接 Tx 和 Rx 天线. 收发端天线均采用垂直极化的双锥全向天线(SZ-18004000/P),工作频率为 18~40 GHz,其中发射端采用控制云台实现的虚拟均匀平面阵列(Uniform Plane Array, UPA),阵列中心 O 与投影仪间的垂直距离为 3.43 m. 测量的中心频率为 28 GHz,频率采样点为 2001,中频带宽为 2 kHz. 在兼顾测量精度和效率的情况下,Tx 天线阵列由步进电机控制实现,使其在水平面 x 轴和垂直面 y 轴以 6 mm (大于 $\lambda/2$)阵元间距扫描测量,阵列大小分别设置为 4×4、10×10、20×20. 为了改善测量信号质量,测量系统的 Tx 和 Rx 分别采用了微波功率放大器(80262)和低噪声放大器(80232),系统参数如表 1 所示.

3 毫米波 3D-MIMO 无线信道参数提取算法

本节借鉴文献[16]提出的可适用于 MIMO 信道的

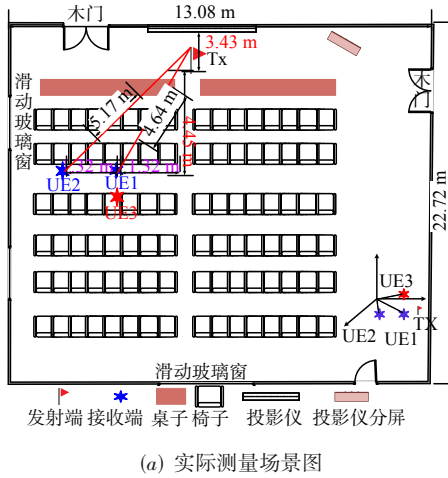


图1 测量场景方案示意图

表1 测量系统参数

参数	数值
测量频段	26~30 GHz
中心频率	28 GHz
频率分辨率	2 MHz
扫频点数	2001
中频带宽	2 kHz
测量带宽	4 GHz
发射/接收天线	垂直极化双锥全向天线
UPA阵元间距	6 mm
UPA阵列大小	4×4, 10×10, 20×20
发射天线高度	0.92 m
接收天线 UE1、UE2 高度	1.07 m
接收天线 UE3 高度	1.31 m
UE1 与 UE2 的水平间距	1.32 m
UE1 与 UE3 的间距	0.24 m

FD-SAGE算法,改进频域接收信号模型,以及发射天线阵列和接收天线的导向矢量,使其适用于发射端为UPA和接收端为单天线的传播信道,进而将其应用到

毫米波3D-MIMO信道中,实现对多用户时延三维空间角度信息的联合估计.

Tx是使用全向天线构建的虚拟UPA($m \times n$)多天线阵列,Rx为一个全向天线.信道建模方法借鉴文献[16],假设每个用户的接收信号均为 L 条路径的叠加和,则频域内信道脉冲响应被建模为

$$H(f; \Psi_T, \Psi_R) = \sum_{l=1}^L \alpha_l \delta(\Psi_T - \Psi_{T,l}) \delta(\Psi_R - \Psi_{R,l}) e^{-j2\pi f \tau_l} \quad (1)$$

其中, $\delta(\cdot)$ 为单位脉冲函数, α_l 、 τ_l 、 $\Psi_{T,l}$ 和 $\Psi_{R,l}$ 分别表示第 l 条径的频率、复振幅、时延、AoA和AoD. Ψ_T 与 Ψ_R 是由水平角 ϕ 和俯仰角 θ 确定的单位向量.以发射端为例,导向矢量中的单位向量 $\Psi_{T,l}$ 可表示为

$$\Psi_{T,l} = (\cos \phi_{T,l} \sin \theta_{T,l}, \sin \theta_{T,l} \sin \phi_{T,l}, \cos \theta_{T,l})^T \quad (2)$$

其中,上标T表示转置,水平方位角和俯仰角取值范围为 $(\phi_{T,l}, \theta_{T,l}) \in [0, 2\pi) \times [0, \pi]$.在每个频点处, $H(f; \Psi_T, \Psi_R)$ 表示大小为 $m \times n$ 的频率内信道响应矩阵,将参数向量 α_l 、 τ_l 、 $\Psi_{T,l}$ 和 $\Psi_{R,l}$ 统一定义为集合 Θ ,当频点取值范围为 $1 \leq k \leq K$ 时,第 k 个频点处时的频域内接收信号表示为

$$H(f_k; \Theta) = \sum_{l=1}^L \alpha_l a(\Psi_{R,l}) b^T(\Psi_{T,l}) e^{-j2\pi f_k \tau_l} \quad (3)$$

式中, $\Theta_l = [\alpha_l, \tau_l, \phi_l, \theta_l]$ 为第 l 条路径的参数向量,其元素分别为路径复幅度、时延、AoA和EAOA, f_k 是第 k 个频点对应的频率值. $a(\Psi_{R,l})$ 与 $b(\Psi_{T,l})$ 分别表示Tx和Rx阵列的导向矢量,即到达角和离开角的信道响应.

对接收信号路径参数提取的迭代过程与SAGE算法相似,同样分为“E”和“M”步骤,但改进的算法在“E”步骤中采用SIC技术对多径信号根据功率进行排序,并且接收到的信道响应对多径信号连续地估计和消除,因此第 l 条路径的完备数据可以表示为

$$\hat{H}'_l(f_k; \hat{\Theta}'_l) = H(f_k; \Theta) - \sum_{i=1}^{l-1} \alpha_i a(\hat{\Psi}'_{T,i}) b(\hat{\Psi}'_{R,i}) e^{-j2\pi f_k \tau_i} \quad (4)$$

其中,“ \wedge ”类参数为第 l 条路径的初始或上一次迭代后的估计值.对被分离出来的多径信号 $\hat{H}'_l(f_k; \hat{\Theta}'_l)$ 的路径参数进行迭代搜索,寻找使似然函数最大的角度值和时延值,表示为

$$\hat{\Psi}''_{T,l} = \arg \max_{\Psi_T} \left\{ z(\hat{\tau}'_l, \Psi_T, \hat{\Psi}'_{R,l}; \hat{H}'_l(f_k; \hat{\Theta}'_l)) \right\}$$

$$\hat{\Psi}''_{R,l} = \arg \max_{\Psi_R} \left\{ z(\hat{\tau}'_l, \hat{\Psi}''_{T,l}, \Psi_R; \hat{H}'_l(f_k; \hat{\Theta}'_l)) \right\} \quad (5)$$

$$\hat{\tau}''_l = \arg \max_{\tau} \left\{ z(\tau, \hat{\Psi}''_{T,l}, \hat{\Psi}''_{R,l}; \hat{H}'_l(f_k; \hat{\Theta}'_l)) \right\}$$

$$\hat{\alpha}''_l = \frac{1}{mnK} z[\hat{\tau}''_l, \hat{\Psi}''_{T,l}, \hat{\Psi}''_{R,l}; \hat{H}'_l(f_k; \hat{\Theta}'_l)]$$

其中, $\Psi_{T,l}$ 、 $\Psi_{R,l}$ 分别表示Tx和Rx待估计的参数,即

$\Psi_{T,l}'' = [\hat{\phi}_{T,l}'', \hat{\theta}_{T,l}'']$, $\Psi_{R,l}'' = [\hat{\phi}_{R,l}'', \hat{\theta}_{R,l}'']$. 式(5)中的似然函数表示为

$$z = \mathbf{a}^H(\Psi_{T,l}) \mathbf{b}^*(\Psi_{R,l}) \sum_{k=1}^K e^{j2\pi f_k \tau_k} \hat{\mathbf{H}}_l'(f_k; \hat{\boldsymbol{\theta}}_l') \quad (6)$$

其中, $[\cdot]^H$ 为共轭转置, $[\cdot]^*$ 为共轭运算符. 当估计出的三个参数集的变化小于给定阈值时, 搜索迭代结束.

不同于文献[16]所提出的算法, 改进算法在迭代更新过程中采用参数优先化, 首先更新空间参数, 然后更新时延参数, 最后更新复振幅.

4 结果分析

4.1 多径功率时延谱

由于发射信号经过不同路径到达接收机的时间不同, 导致了多径信号的时间色散现象. 本节通过对多径时延功率谱的分析, 描述了室内多径传播条件下路径在时域上的色散特性. 图2给出了UE1和UE2在三种天线阵列下测量的功率时延谱.

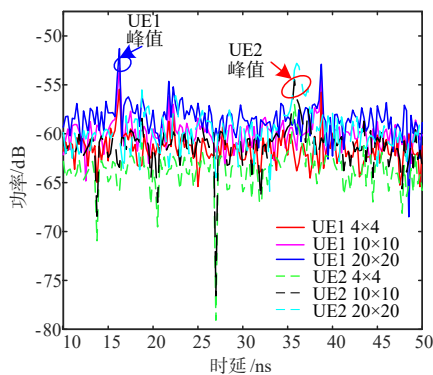


图2 两用户不同天线阵列的多径功率时延谱

从图2中可以观察到, 多径信号的时延功率值随着UPA增大而增大, 如UPA阵列大小为400时UE1的功率峰值约为-51 dB, 相比阵列大小16增加了约4 dB,

UE2的峰值功率相较于UE1降低了2 dB. 同时, UE1和UE2接收到的第一条路径的传播时延分别为16 ns和37 ns, 即收发机间直射路径距离分别为4.8 m和11.1 m, 然而实际直射路径距离为4.64 m和5.17 m, 说明了UE1存在LoS径而UE2不存在, 这是因为UE2距离发射端天线阵列较远, 并且相较于UE1, 与发射端天线阵列之间隔有更多的桌椅等障碍物, 引起绕射和散射等传播机制, 在一定程度上产生传播损耗, 致使接收信号功率降低, 且较为分散.

4.2 多径功率角度谱

为了准确描述信号经过信道后的角度色散程度, 本节分析了不同天线阵列大小下UE1三维空间角度功率分布.

图3给出UE1在三种UPA下的三维空间功率角度谱, 横坐标表示AoA, 纵坐标表示EAoA, 颜色表示功率强度, 红色代表最强, 蓝色代表最弱. 由图3得出, 信号功率主要分布在-70~-50 dB之间, 图3(a)显示出UE1在阵列大小为4×4时的三维角度功率分布, 可以观察到多径信号在角度域的色散程度较小, 接收功率主要分布在两个角度范围: 水平角度分别为60°~80°和190°~210°, 垂直角度为90°~100°之间. 从图3可以看出, 三维空间角度的分辨率与天线阵列大小呈正相关, 具体表现为阵列越大信号分布越集中(与文献[10]功率角度谱结论一致), 这是因为增加天线阵元数目时多径信号功率在3D空间内的分布更加聚集, 并且聚集程度规律为阵元数目400>100>16. 图4为不同大小平面阵的辐射方向特性, 可以看出毫米波3D-MIMO的阵列变化会影响天线的三维辐射特性, 具体表现为UPA数量越大, 波束辐射范围越广, 旁瓣分辨率越高且呈现出明显的分簇特性. 结合图3、图4, 表明增加天线阵元数量有利于提高多径信号在三维空间的分辨率, 进而能够充分地利用空间域提升系统容量.

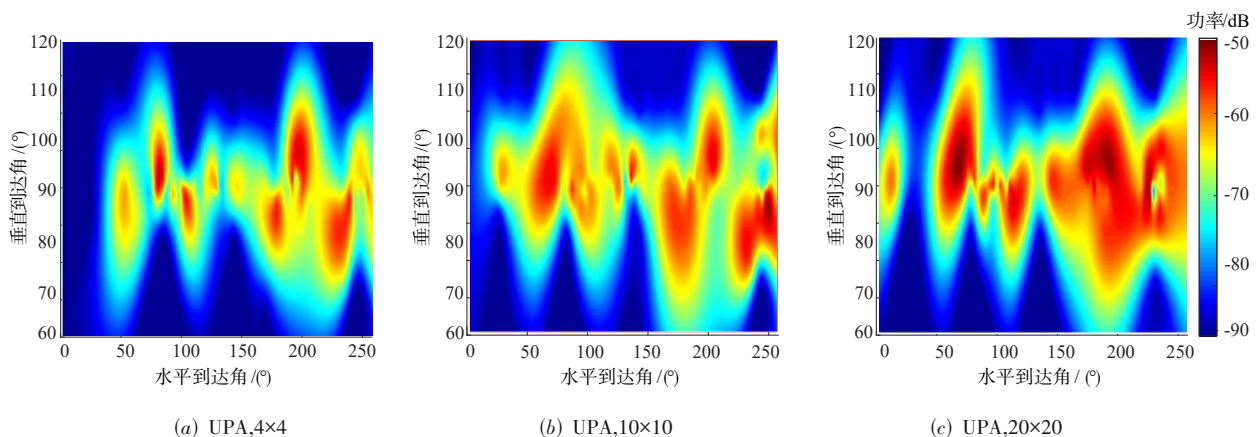


图3 不同阵列下UE1的功率角度谱

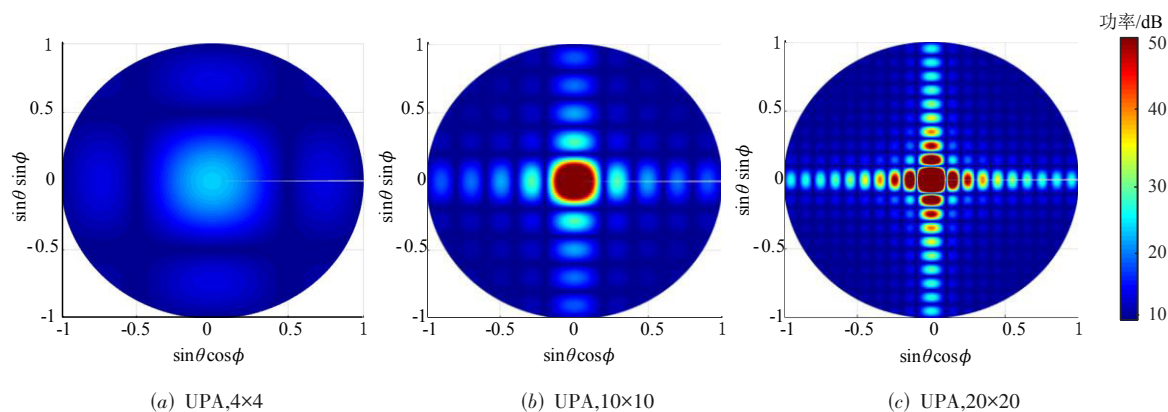


图4 不同平面阵的辐射方向特性

4.3 多径参数提取

为了验证提出算法的性能,下面分别采用改进的FD-SAGE算法和SAGE算法提取路径参数,并且与图2、图3的非参数计算结果进行比较.提取算法中传播路径设置为60条,迭代次数为20次.

图5给出了三个用户在三种天线阵列下的参数提取结果,可以观察到多径信号在三维空间域中的功率分布与图2、图3的结果一致,具体特性为UE2的传播时延大于UE1,天线阵列越大,多径信号功率越大.同时,两种算法的参数提取结果虽略有差异,但是总体分布规律一致,这说明改进的FD-SAGE算法能够准确地估计出时延和三维空间角度参数,能够较好地适用于三维空间下毫米波3D-MIMO无线信道.

进一步地,图6给出了UE1在阵列大小为400时的功率时延谱.结果表明在多径分布较为密集 M 和 N 区域,改进的FD-SAGE算法的提取结果与实测结果间的拟合误差低于SAGE算法,提高了多径时延提取的准确性.

4.4 UE1的时延和角度扩展特性

时延扩展(Delay Spread, DS)和角度扩展(Angle Spread, AS)是衡量信道小尺度衰落的重要参数,分别代表了多径信号在时延域和角度域的色散程度.基于图5的参数提取结果,本节分析UE1的接收信号在不同阵列大小下的时延扩展和水平角度扩展(Azimuth Angle Spread, AAS).

根据WINNER II中的定义^[17],DS表示为

$$\tau_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_1^L |\alpha_l| \tau_l^2}{\sum_1^L |\alpha_l|} - \left(\frac{\sum_1^L |\alpha_l| \tau_l}{\sum_1^L |\alpha_l|} \right)^2} \quad (7)$$

AS被定义为

$$\psi_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_1^L |\alpha_l| \Psi_l^2}{\sum_1^L |\alpha_l|} - \left(\frac{\sum_1^L |\alpha_l| \Psi_l}{\sum_1^L |\alpha_l|} \right)^2} \quad (8)$$

其中, Ψ_l 表示第 l 条传播路径的角度值,同时包含了水平角 ϕ 和俯仰角 θ .

基于SAGE算法和改进的FD-SAGE算法,图7为UE1在三种天线阵列下计算出的DS和AAS.从图7中能够观察到随着阵元数目的增加,提取路径的DS和AAS逐渐增大,其中UPA为 20×20 时的扩展最大.这是由于阵元数目为400时的天线辐射范围最大,多径时延与角度色散程度大,可以提取出最大范围的时域和三维空间角域的传播路径.在 E 和 F 区域,不同天线阵列的信道特性参数值较为逼近,这可能是由于 4×4 和 10×10 阵列的几何位置较低,传播信道的非平稳特性较小.当天线阵列大小一致时,利用改进的FD-SAGE算法与SAGE算法所提取的参数,统计出的DS和AAS拟合较好,拟合误差随着天线数目的增加而减少,阵列大小为400时,DS和AAS的拟合误差分别为3.5%和6.2%.时延扩展在10~15 ns范围时(如图7(a)中的 A 区域),改进的FD-SAGE算法的累积分布函数小于SAGE算法,这表明改进算法在提取多径时延分辨率较大.图7(b)还表明改进算法的角度扩展特性与时延扩展具有相似的变化规律,但分辨率随阵列数目变化的幅度较小.

4.5 多径分簇特性

信号在传播过程中,传播路径会在室内复杂环境下进行分簇.本节使用K-means算法对多径路径进行分簇,研究不同天线阵对多径信号分簇的影响,分析阵列大小相同时两种算法的分簇结果以及簇内信道特性.

针对UE1,图8给出改进的FD-SAGE算法在不同天线阵列下的路径分簇情况.从图8中可以观察到,随着天线阵列大小的增加,分簇数目增加,这是因为多径在空间域的分辨率随着天线阵元数目呈正相关特性.当天线阵列增大时,多径信号会从不同维度被划分为不同的簇.阵列大小从 4×4 变换为 20×20 时,时域和水平角域上的传播路径分簇个数分别为4个、5个和7个,簇内路径数量逐渐减少,这表明在更大规模的阵列下传播路径表现出更明显的稀疏分簇特性.在阵列

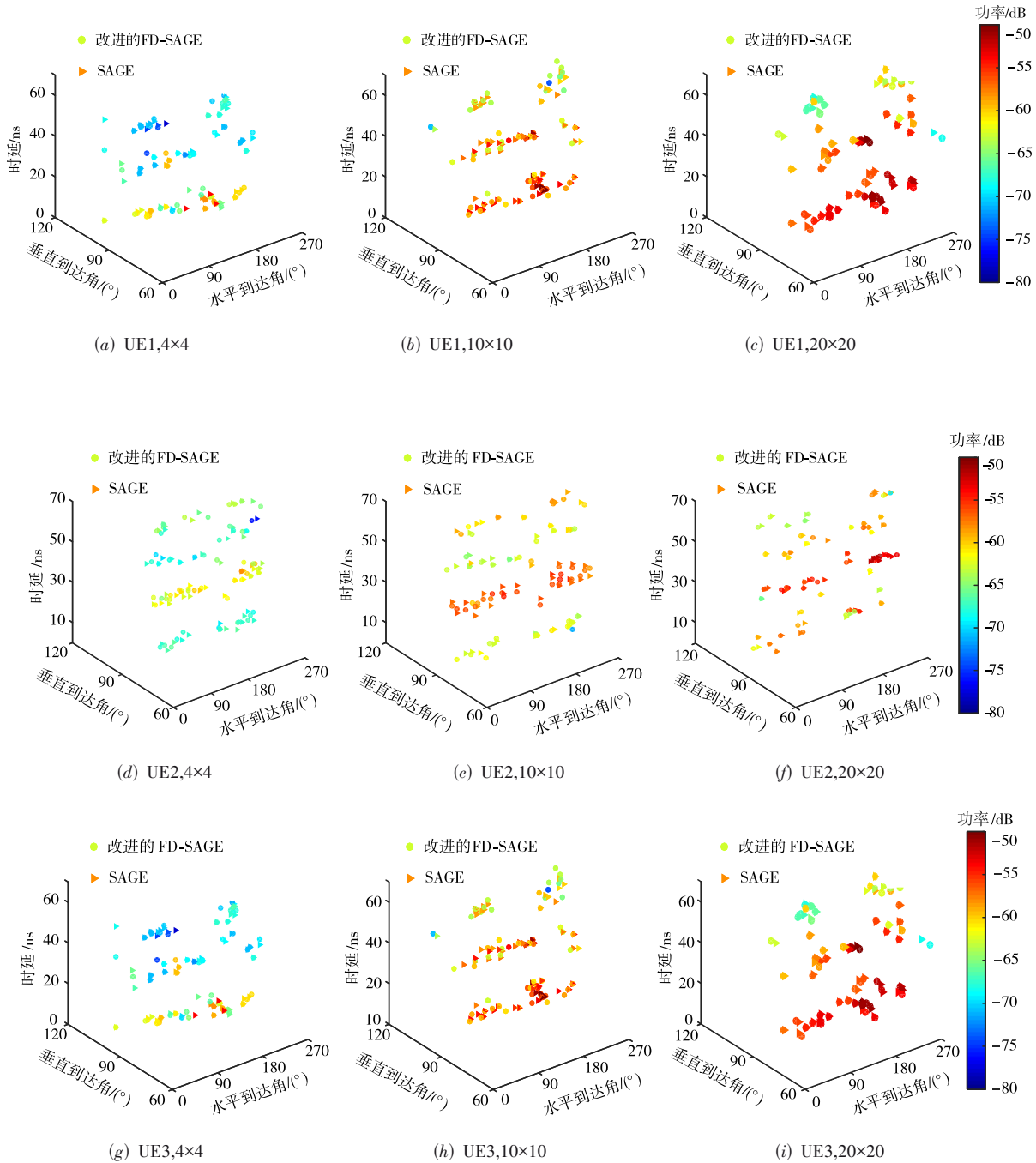


图5 三个用户的时延与三维空间角度联合提取结果

大小为 20×20 时的簇中心的时间及三维空间参数信息分别为 $C_1=(14.8 \text{ ns}, 218^\circ, 90.3^\circ)$, $C_2=(20.6 \text{ ns}, 188.4^\circ, 90.4^\circ)$, $C_3=(15.8 \text{ ns}, 92.6^\circ, 90^\circ)$, $C_4=(39 \text{ ns}, 217.3^\circ, 90.55^\circ)$, $C_5=(40.5 \text{ ns}, 100^\circ, 90.5^\circ)$, $C_6=(50.9 \text{ ns}, 243.4^\circ, 91.3^\circ)$, $C_7=(60.3 \text{ ns}, 98.1^\circ, 90.4^\circ)$, 可以观察到簇1和簇3,簇4和簇5的时延相近,簇5~7时延较大,说明了多径信道的反射和散射情况,进一步也表明,K-means算法在充分挖掘信道信息上还存在局限性.

图9对比了UE1阵列大小为 20×20 时两种路径参数提取算法的K-means分簇结果.图9(a)是测量的功率时延角度谱,接收功率是稀疏多径成分的叠加和,其数值大小主要受发射端阵列辐射特性与传播环境中墙壁、桌椅等物体的影响.图9(b)是SAGE算法提取路径参数的分簇结果,多径信号被分为7个簇,灰度代表功率,可以看出分簇结果较为合理,边界清晰可辨,体现了传播环境中物体的空间分布.图9(c)是改进的FD-

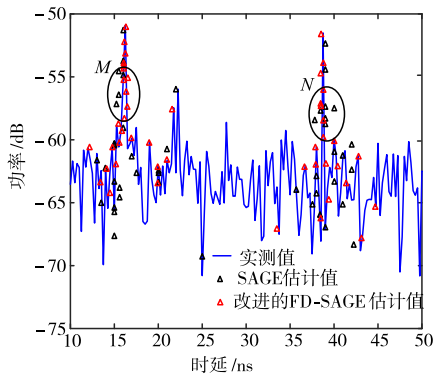


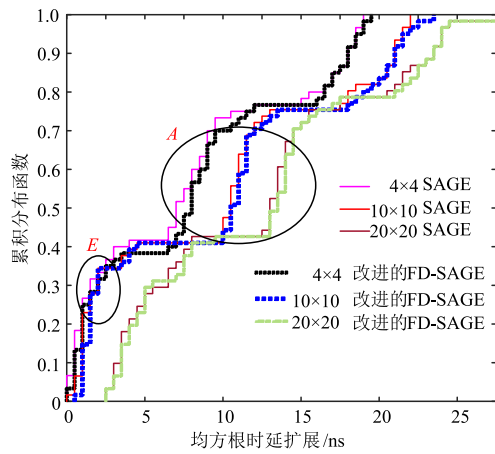
图6 阵列为20×20的功率时延谱

SAGE算法提取路径参数的分簇结果. 相比图9(b), 簇内的相似度更高, 尤其是功率较强的簇内相似特性更为显著. 进一步, 表2给出了簇内的路径参数, 用以研究相似特性. 相比SAGE算法, 改进算法簇内参数均值

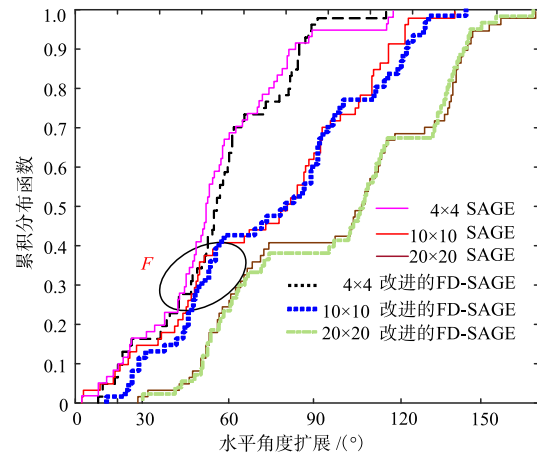
均较小, 这说明了改进算法提取的传播路径参数在时域和三维空间角度域上具有较大的相似性, 算法的簇内分辨率性能更高.

表2 两种算法簇内路径参数

参数簇	SAGE算法				改进的3D-FD-SAGE算法			
	L	$\bar{\tau}/\text{ns}$	$\bar{\phi}/(^{\circ})$	$\bar{\theta}/(^{\circ})$	L	$\bar{\tau}/\text{ns}$	$\bar{\phi}/(^{\circ})$	$\bar{\theta}/(^{\circ})$
簇1	12	14.8	218	90.3	13	14.7	217	90.1
簇2	5	20.6	188.4	90.4	5	20.4	188	90.1
簇3	8	15.8	92.6	90	9	15.72	92.3	90
簇4	15	39	213.7	90.55	13	38.95	213.5	91.2
簇5	8	40.5	100	90.5	9	40.4	99.5	90
簇6	5	56.88	243.4	91.3	7	56.7	242.6	90.7
簇7	7	60.3	98.1	90.4	7	60.1	97.6	90

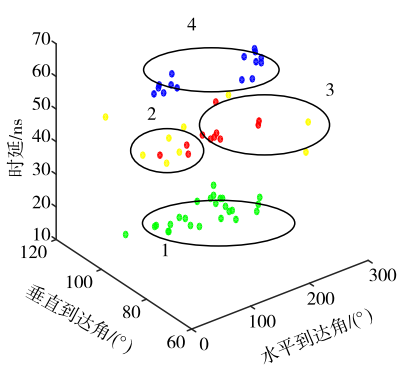


(a) 时延扩展

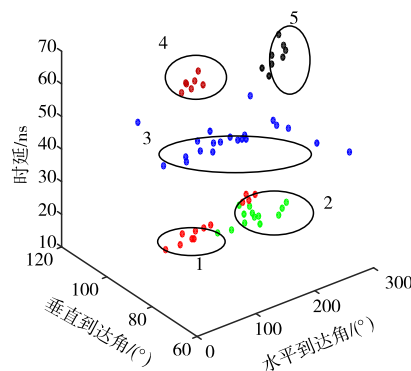


(b) 水平角度扩展

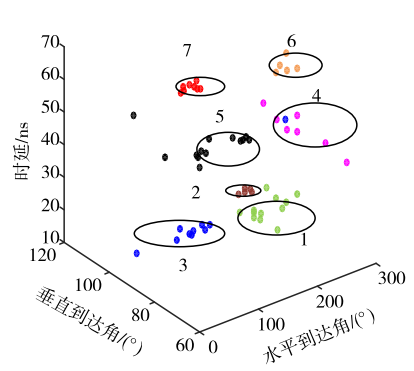
图7 两种算法提取结果的累积分布函数曲线



(a) UPA, 4×4

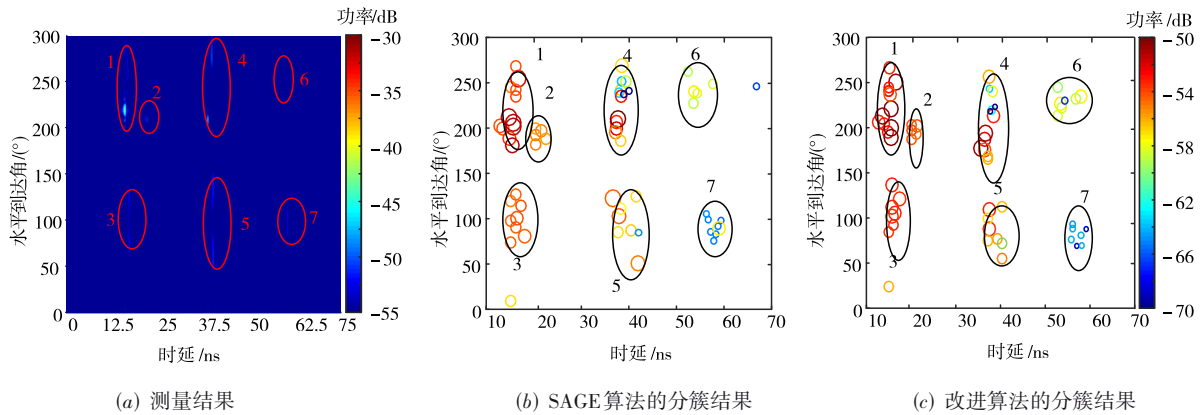


(b) UPA, 10×10



(c) UPA, 20×20

图8 不同阵列下改进算法的多径分簇结果

图9 阵列数为 20×20 时两种算法提取路径的分簇特性

5 结束语

本文面向室内多径传播毫米波 3D-MIMO 无线信道, 基于测量研究了参数提取与多径分簇特性. 利用搭建的室内毫米波 3D-MIMO 测量平台开展了多径传播条件下多用户无线信道频域测量; 改进 FD-SAGE 算法使其适用于 T_x 为多天线的无线信道, 深入研究三个用户的功率时延角度谱、时域和角度域信道特性与多径分簇特性. 结果表明相比 SAGE 算法, 改进算法能够更准确地提取多用户的时延参数, 且簇内的多径时延分辨率性能与分簇特性随着阵列大小增加而增加. 本文为室内多径传播条件下的毫米波 3D-MIMO 多用户无线信道提供了有用的测量数据, 研究结果为室内毫米波信道建模提供了有价值的参考.

致谢 感谢任明浩与郭琼阳对本文的指导与帮助.

参考文献

- [1] ZHENG Kan, ZHAO Long, MEI Jie, et al. Survey of large-scale MIMO systems[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(3): 1738-1760.
- [2] 冯瑞. 5G 毫米波大规模阵列信道参数提取与特性分析[D]. 山东: 山东大学, 2018.
- [3] ZHANG J, SALMI J. Analysis of kurtosis-based LOS/NLOS identification using indoor MIMO channel measurement[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(6): 2871-2874.
- [4] SCHMIDT R. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, 34(3): 276-280.
- [5] VEEN V, BUCKLEY K M. Beamforming: a versatile approach to spatial filtering[J]. *IEEE ASSP Magazine*, 1988, 5(2): 4-24.
- [6] ROY R, PAULRAJ A, KAILATH T. ESPRIT—a subspace rotation approach to estimation of parameters of cisoids in noise[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, 34(5): 1340-1342.
- [7] ROY R, KAILATH T. ESPRIT—estimation of signal parameters via rotational invariance techniques[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1989, 37(7): 984-995.
- [8] FEDER M, WEINSTEIN E. Parameter estimation of superimposed signals using the EM algorithm[J]. *IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing*, 1988, 36(4): 477-489.
- [9] FLEURY B H, TSCHUDIN M, HEDDERGOTT R, et al. Channel parameter estimation in mobile radio environments using the SAGE algorithm[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17(3): 434-450.
- [10] ZHANG Jian-hua, ZHENG Zhe, ZHANG Yu-xiang, et al. 3D MIMO for 5G NR: several observations from 32 to massive 256 antennas based on channel measurement[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(3): 62-70.
- [11] MUSAYANAH, HANDAYANI P, HENDRANTORO P, et al. Performance analysis of the SAGE algorithm: changing the update procedure[C]//PRATIWI M. *International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*. Mataram, Indonesia: IEEE Press, 2016: 237-242.
- [12] ATAHIR F O, SUN W S, VARUS M L, et al. MIMO channel estimation based sparse VB-SAGE algorithm for wireless devices[C]//WANG Jun. *International Conference on Artificial Intelligence and Big Data(ICAIBD)*. Chengdu: IEEE Press, 2018: 235-239.
- [13] CAI Xue-song, FAN Wei, A complexity-efficient high resolution propagation parameter estimation algorithm for ultra-wideband large-scale uniform circular array[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(8): 5862-5874.
- [14] CHONG C C, LAURENSEN D L, TAN C M, et al. Joint detection-estimation of directional channel parameters us-

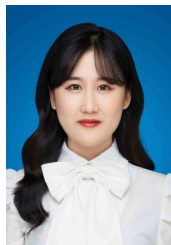
- ing the 2-D frequency domain SAGE algorithm with serial interference cancellation[C]//YATES R D. IEEE International Conference on Communications(ICC). New York: IEEE Press, 2002: 906-910.
- [15] MATTHAIIOU M, LAURENSEN D I, RAZAVI-GHODS N, et al. Characterization of an indoor MIMO channel in frequency domain using the 3D-SAGE Algorithm[C]//QAUSARSBIIEEE International Conference on Communications (ICC). Glasgow: IEEE Press, 2007: 5868-5872.
- [16] FENG Rui, HUANG Jie, SUN Jian, et al. A novel 3D frequency domain SAGE algorithm with applications to parameter estimation in mm-Wave massive MIMO indoor channels[J]. Science China Information Sciences, 2017, 60(8): 080305.
- [17] MEINIL J, KYETI P, JMS T. WINNER II Channel Models[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.

作者简介



廖 希 女,1988 年出生于四川省绵阳市,现为重庆邮电大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为涡旋电磁波及其应用、无线信道电波传播、多径参数提取与信道建模等.

E-mail: liaoxi@cqupt.edu.cn



黄晨曦 女,1996 年出生于陕西省渭南市,现为重庆邮电大学硕士研究生,主要研究方向为毫米波 3D-MIMO 信道建模与多径参数提取算法.

E-mail: S190101033@stu.cqupt.edu.cn



王 洋 男,1986 年出生于重庆市,现为重庆邮电大学副教授,博士生导师,研究方向为天线与电波传播、涡旋电磁波、雷达信号处理、微波相位调制等.

E-mail: wangyang@cqupt.edu.cn



车延庭 男,1987 年出生于黑龙江省伊春市,现为电子信息控制重点实验室高级工程师,研究方向为无源侦察、阵列信号处理等.

E-mail: cheyanting_heb@126.com