

## 采用可穿戴圆极化天线的离体信道特性建模与分集接收方法

吕文俊, 崔鹏飞, 朱洪波

(南京邮电大学通信技术研究所, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 提出了采用一对反旋向平面端射圆极化可穿戴天线进行分集的体域通信抗多径接收方法, 其原理是利用平面端射圆极化天线的俯仰面宽波束特性克服身高变化带来的幅度衰落, 并利用其圆极化特性改善来波极化失配引起的深度衰落。在 5.8 GHz 频段上设计了天线实物, 然后测量体域传播特性并建立离体分集信道模型, 进而研制了信道仿真器, 并与线极化天线分集情况进行比较。实验与仿真结果表明, 同等条件下圆极化分集的等增益合并功率电平比线极化分集平均提升 2.1 dB, 多径均方根时延扩展及多径数显著降低, 系统传输误码率可降低一个数量级, 充分验证了体域圆极化天线分集接收方法的正确性及有效性。

**关键词:** 平面端射圆极化天线; 可穿戴天线; 离体信道; 分集接收; 抗衰落

**中图分类号:** TN820

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2018.00051

## Off-body channel modelling and diversity reception approach using wearable circularly polarized antenna

LYU Wenjun, CUI Pengfei, ZHU Hongbo

Institute of Communication Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

**Abstract:** An anti-fading diversity receiving approach to body-area communications was proposed. A pair of opposite-sense called planar endfire circularly polarized antennas (PECPA) was employed to implement the receiving approach. The wide beamwidth CP characteristic of the PECPA was used to mitigate the height-dependent fadings. Antenna designs and body-area propagation measurements were performed at 5.8 GHz-band. An off-body channel model was established, and a channel simulator was accordingly developed. All results were compared to the cases using linearly polarized (LP) antennas diversity on equal conditions. The results show that the equal-gain-combination (EGC) signal levels for CP diversity reception are 2.1 dB greater than the LP one (with polarization mismatching loss removed). The root-mean-square delay spread (RDS) and number of multi-path component (MPC) can be significantly reduced. In addition, the simulated bit error rate (BER) of the body-area communication system using CP diversity can be improved by one order of magnitude compared the LP diversity one. The correctness and effectiveness of the proposed approach has been evidently validated by the experimental and simulated results.

**Key words:** planar endfire circularly polarized antenna (PECPA), wearable antenna, off-body channel, diversity reception, anti-fading

### 1 引言

未来新一代信息系统将位于信息空间内的用户(人)和事物都以泛在信息网络的形式连接起来,

通过信息空间之间的数据传输和交互, 实现类人化的知识学习、分析处理、自动决策和行为控制, 最终提供用户所需的智慧服务<sup>[1]</sup>。用户信息空间与环境信息空间之间信息交互、环境智能<sup>[2]</sup>及智慧服务

收稿日期: 2018-03-16; 修回日期: 2018-05-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61427801, No.61471204)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (No.61427801, No.61471204)

的实现, 取决于体域网与接入点之间的可靠连接。因此, 研究体域网和接入点之间的无线链路特性成为构建新一代信息系统的关键基础问题<sup>[1]</sup>之一。长期以来, 因人体介入而导致的深度衰落现象广泛存在<sup>[3]</sup>, 如何精确描述体域衰落信道特性、提高体域通信系统性能, 都是极具挑战性的难题。与描述可穿戴传感器间传播特性、借助人体“爬行波效应”实现准无线耦合传输的常规短距离体域信道<sup>[4-6]</sup>不同, 新一代信息系统需要的体域信道模型属于真正的无线信道模型, 主要用于描述体域网与接入点(网关)之间的传输特性, 即离体(off-body)传播特性<sup>[7]</sup>, 其传播尺度更大(典型值为 2~10 m)、工作频率更高。一般而言, 精确描述体域衰落信道特性需要在传播模型中引入天线穿戴位置<sup>[7-8]</sup>、人员密度变化<sup>[9-11]</sup>、姿态变化<sup>[12-13]</sup>和身高<sup>[14-17]</sup>因子等统计量。在获取路径损耗、时延扩展和相干带宽等传播特性参数基础上, 建立信道冲激响应(CIR)模型, 就能模拟通信信号在衰落信道中的传输性能, 为体域通信系统的物理层算法设计提供支持<sup>[18-19]</sup>。为了减少信号深度衰落带来的传输性能劣化, 可以采取分集接收<sup>[20]</sup>的方法。从基本传播机理上分析, 人体存在而引起的信号深度衰落现象, 主要来自密集损耗<sup>[9-11]</sup>、躯干效应<sup>[12-13]</sup>、身高改变<sup>[14-17]</sup>及极化失配<sup>[20]</sup>等因素。事实上, 国外课题组已经针对类似问题提出了用于体域通信系统的圆极化贴片天线设计方法<sup>[21-22]</sup>。然而这些方法仅仅局限于天线单元设计, 并未研究体域信道特性。只有同时从天线辐射场形(方向图)和极化这 2 个方面入手, 提出新型天线分集接收方法、建立新型体域信道模型, 才能克服深度衰落、提高体域通信系统性能。

基于上述研究现状与背景需求, 提出采用一对反旋向平面端射圆极化天线<sup>[23-26]</sup>作为可穿戴分集天线的体域抗多径接收方法。与文献<sup>[21-22]</sup>的新工艺贴片天线(其典型波束宽度约为 60°)相比, 平面端射圆极化天线具有半功率波束宽度超过 180°的俯仰面波束<sup>[23-26]</sup>, 故能在很大角度范围的来波方向上提供均匀的幅度响应; 另一方面, 其宽波束圆极化特性<sup>[26]</sup>能在大角度范围内接收任意极化来波信号, 从而充分补偿极化失配带来的深度衰落现象<sup>[27-28]</sup>; 此外, 平面端射圆极化天线的剖面高度通常不高于中心频率对应波长的 0.1 倍, 便于实现与人体及衣物的共形设计, 不需要借助复杂工艺(例如, 纳米银工艺及人工磁导体表面<sup>[21]</sup>, 或外接馈电网络<sup>[22]</sup>)即

可实现, 非常适合可穿戴应用。

基于上述独特辐射性能和低剖面特性, 如果将一对反旋向的平面端射圆极化天线分别佩戴在人体的两肩, 利用其超宽俯仰面波束特征及圆极化特性实现宽来波角度内的分集接收, 将有望克服身高姿态(即俯仰维度姿态)变化带来的信号深度衰落现象, 从而达到提高体域无线通信系统性能的目标。依据上述思想, 下面将在 5.8 GHz 频段的室内环境中展开分集实验, 建立体域无线传播模型及信道模型, 进而设计体域信道仿真器、模拟常用数字调制信号在真实体域衰落信道中的传输性能, 并与采用一对线极化天线进行分集的同等情况进行比较分析。

## 2 信道测量及建模

### 2.1 测量方案概述

体域圆极化天线分集接收实验在室内病房环境中进行, 同步收发信机为矢量网络分析仪<sup>[29]</sup>。考虑到不同人对传播特性产生的影响差异, 2 个天线依次佩戴在 7 名人员身上进行实验。在 1~7.2 m 的直线路径上设置 10 个大尺度采样点, 每个网格点设置 3 个小尺度采样点, 每个采样点测量 10 次, 每次于 5.7~5.9 GHz 频段等间隔采样 401 次, 累计超过 250 万组测量数据。

作为新型圆极化接收方案, 接收天线应具备 2 个特征。1) 俯仰面具有宽波束特性: 确保在整个身高方向上都能有效接收到多径分量, 如图 1 所示; 2) 圆极化特性: 确保任意极化方向的来波都能被接收, 减少深度小尺度衰落带来的均方根时延扩展(RDS, root-mean-square delay spread)剧烈波动现象。作为比较, 在同样环境、同样设备与人员配置情况下, 选择了 2 组线极化天线进行分集接收: 1) 线极化微带贴片天线(表示为 LP Patch), 该天线不具备俯仰面宽波束和圆极化这 2 个特性, 其方向图可参考文献<sup>[29]</sup>; 2) 线极化平面倒 F 天线(表示为 LP PIFA), 该天线具有俯仰面宽波束特征, 而不具有圆极化特性。所有接收天线均通过相同的两路等幅同相功率合成器合并成一路、连接到矢量网络分析仪的接收端, 发射天线为线极化单极子天线, 高度为 1 m, 发射功率为 0 dBm。本文已考虑收发电缆插损, 并在系统中校准扣除。由于测量仪器是单端口的同步收发信机, 无法实现多条路径的同步测量与合并, 故在接收电路中采用等幅功分器进行合并, 考虑到将来硬件实现的复杂度, 后续信道建模

与仿真中将采用经典文献中充分论证、复杂度最低、应用最广泛的等增益合并方法<sup>[30-31]</sup>。

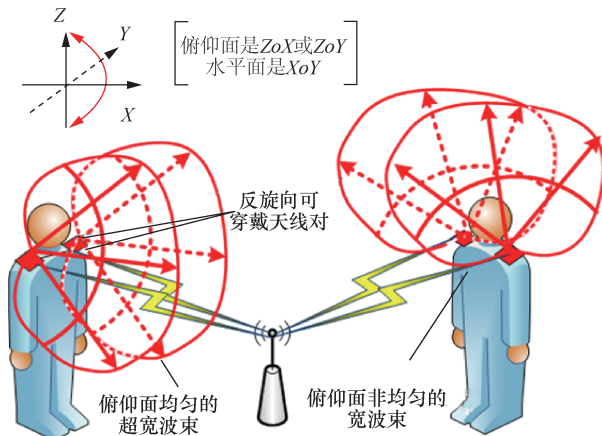


图 1 可穿戴场景及俯仰面均匀/非均匀宽波束特性对比

### 2.2 传播特性参数

图 2 展示了圆极化 (CP) 天线、线极化 PIFA 天线 (LP PIFA) 和线极化贴片天线 (LP Patch) 这 3 种分集方案在各测量点的路径损耗值及最小二乘法拟合的路径损耗模型。3 种方案在 1 m 处的参考路径损耗值均为 49.2 dB，同时给出路径损耗因子  $n=2$ 、3、4 和 5 时的情况作为对比。从图 2 可知，3 种可穿戴分集方案的路径损耗因子  $n$  均大于 2，其中，以圆极化分集的  $n$  值最低。这种现象说明圆极化天线能够有效分集接收不同极化的来波，从而降低传播损耗。另外，在各大尺度格采样点上的阴影效应使 3 种方案的接收功率电平围绕着路径损耗预测值上下波动，其统计特性都呈 0 均值高斯分布，对应的方差分别为 2.1、3.2 和 3.0，可见圆极化分集方案的抗阴影效果显著优于同为俯仰面宽波束特性的线极化 PIFA 方案，这充分验证了利用天线的圆极化特性可以有效接收任意极化来波，明显降低接收功率电平波动。

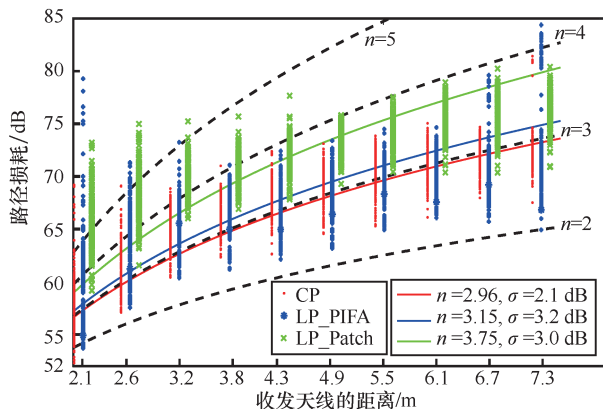


图 2 3 组方案的路径损耗对比

均方根时延扩展和多径分量数目 (MPC, multi-path component) 是表征离体信道的重要参量<sup>[27-28]</sup>。图 3 和图 4 分别展示了 3 组方案的均方根时延扩展和多径分量数目随收发天线距离及不同穿戴者而变化的三维柱形图。图 3 表示每组方案在 10 个大尺度采样点 (最大范围为 7 m) 上，3 位不同穿戴者 (编号为 1、4、7) 的均方根时延参数的对比。圆极化分集方案、LP PIFA 分集方案和 LP Patch 分集方案在距离维度上的平均均方根时延分别为 7.8 ns、9.1 ns 和 9.5 ns，在人员维度上的平均均方根时延扩展则分别为 6.3 ns、7.9 ns 和 9.8 ns。可见，无论是对距离还是人员而言，体域圆极化分集方案比线极化分集方案均可以显著降低均方根时延扩展。另外，值得注意的是，随着距离从 4 m 增加到 7 m，圆极化方案的均方根时延扩展只有小幅波动，而 2 种线极化方案仍呈现较大幅度的波动。3 种方案在不同距离上的均方根时延扩展的标准差分别为 1.1 ns、1.8 ns 和 2.5 ns，可见，圆极化分集方案抗均方根时延扩展波动的效果确实显著优于 2 种线极化方案，进一步验证了利用天线的圆极化特性可以有效降低均方根时延扩展的波动，从而改善小尺度衰落特性。

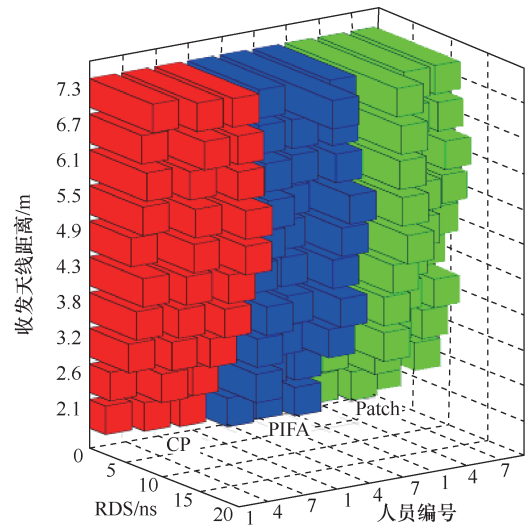


图 3 3 组方案的均方根时延扩展随收发天线距离和穿戴者不同而变化的柱形图

类似地，图 4 展示了 25 dB 动态范围内多径分量数目在距离、穿戴者这 2 个维度上的数值对比。圆极化、LP Patch、LP PIFA 这 3 种方案在距离维度上的平均多径数目分别为 17.5、20 和 22，而在穿戴者维度上的平均多径数目分别为 17.6、18.5 和 19.2。可见，圆极化方案的多径数目最少，表明其

传输路径最集中，潜在抗衰落性能最佳。类似地，平均时延、相干带宽、信号强度分布等其他参数也呈现出同样特征。通过对不同方案的大小尺度参数对比发现，圆极化分集方案可以显著改善均方根时延扩展、多径分量数目等小尺度衰落特性以及这些参数在不同测量点和不同穿戴者身上的波动，有效克服体域通信中常见的深度衰落。

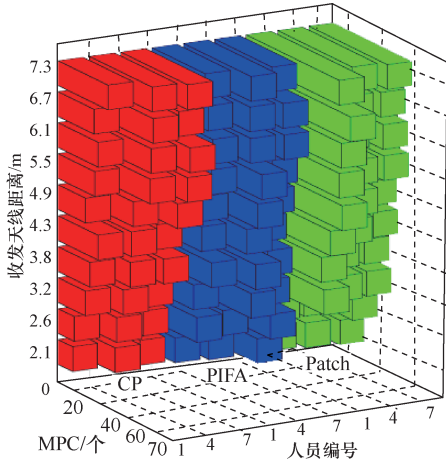


图 4 3 组方案的多径分量数目随收发天线距离和穿戴者不同而变化的柱形图

图 5 和图 6 分别显示了 3 组接收方案均方根时延扩展和多径分量数目的累积概率分布。图 5 和图 6 均显示，圆极化分布曲线和拟合曲线均偏向于最左侧，表明其时延扩展主要分布于低值区间。反之，不具备俯仰面宽波束特性的 LP Patch 主要部分位于最右侧，即呈现最大的时延扩展和多径数目累积分布值。平均时延、相干带宽、信号强度等其他参数也有类似分布特征。上述结果再一次从整体分布角度证明了圆极化分集方案可以有效改善小尺度衰落的特性。另外，图 5 显示圆极化方案在 10% 分位的时延扩展值比 LP PIFA 方案减少 2.5 ns，且分位越低差距越大，在 90% 分位的时延扩展值相对减少 5 ns，且随着分位升高差距扩大。同样的现象可在服从威布尔分布的多径数目分布上观察到。这进一步表明圆极化方案比同为俯仰面宽波束的线极化 Patch 方案在抗深度衰落方面有显著优势。

表 1 展示了 3 种方案的 5 种典型传播参量的累积概率分布值对比情况。3 种方案的相干带宽均服从对数正态分布，圆极化方案有最大的统计值，而 LP Patch 最小。其他 4 种统计参量中，圆极化参数无论是位置参量值（类似正态分布中均值）还是

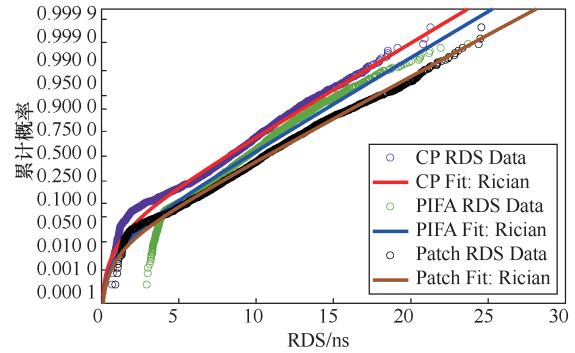


图 5 3 组方案的所有穿戴者和测量点上的均方根时延扩展的累积概率分布

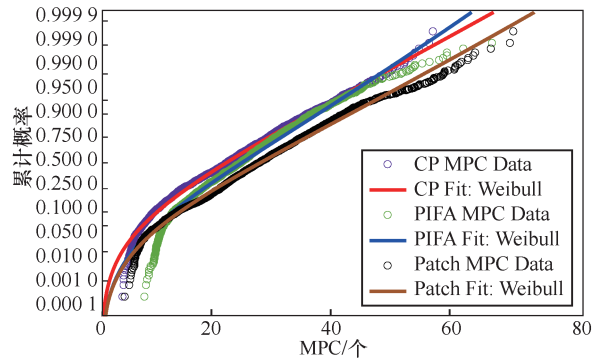


图 6 3 组方案的所有穿戴者和测量点上的多径分量数目的累积概率分布

表 1 3 种方案的 5 种典型传播参量的累积概率分布值对比

方案	特性	分布类型	位置参量	形状参量
圆极化 CP	时延扩展	莱斯分布	$S = 7.02$	$\delta = 4.10$
	多径数目	威布尔	$\lambda = 25.4$	$k = 2.32$
	相干带宽	对数正态	$\mu = 3.37$	$\delta = 0.77$
	信号强度	威布尔	$\lambda = 67.9$	$k = 21.7$
	平均时延	威布尔	$\lambda = 27.5$	$k = 3.18$
线极化 PIFA	时延扩展	莱斯分布	$S = 10.1$	$\delta = 5.93$
	多径数目	威布尔	$\lambda = 27.8$	$k = 2.45$
	相干带宽	对数正态	$\mu = 3.25$	$\delta = 0.73$
	信号强度	威布尔	$\lambda = 69.2$	$k = 14.5$
	平均时延	威布尔	$\lambda = 28.5$	$k = 3.25$
线极化 Patch	时延扩展	莱斯分布	$S = 12.8$	$\delta = 4.36$
	多径数目	威布尔	$\lambda = 31.8$	$k = 2.65$
	相干带宽	对数正态	$\mu = 3.01$	$\delta = 0.64$
	信号强度	威布尔	$\lambda = 73.9$	$k = 23.0$
	平均时延	威布尔	$\lambda = 29.9$	$k = 3.27$

形状参量值（类似正态分布中的方差）均是最小，其次是仅具有宽俯仰面特性的 LP PIFA 方案，而宽波束、圆极化这 2 个特性都不具备的 LP Patch 方案参数值最大。考虑到除相干带宽越大越好外，其他 4 种小尺度参量均为越小越好，再次从严格统计分析角度证明了所选圆极化分集方案比传统线极

化方案更能有效克服衰落。

信号强度的测量和仿真结果如图 7 所示。由图 7 可知，若计入 3 dB 的极化适配损耗，圆极化等增益合并的接收信号强度要比线极化等增益合并的方案提升约 2.1 dB<sup>[28]</sup>。这部分总增益值可以归结为 2 个因素：一是圆极化天线可以接收任意极化的强多径分量；二是线极化天线在人体姿态和高度变化扰动下容易出现极化失配，会带来接收功率损失。因此，圆极化分集方案可在接收信号幅度指标上取得优于线极化分集方案的性能<sup>[29]</sup>。

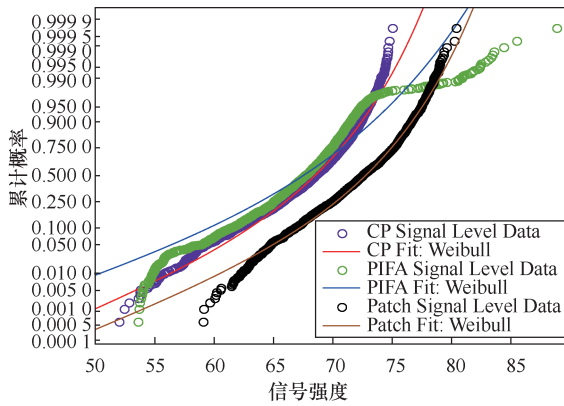


图 7 3 组方案所有穿戴者和测量点上的信号强度的累计概率分布

图 8 统计了 3 种方案在各自中值水平之上的 0~4 dB 范围内的平均衰落时间情况。平均衰落时间是指信号水平跌落到指定衰落水平值以下的平均时间，可以直观反映信号深衰落的程度，因而常被用来表征分集方案对抗深度衰落的改善程度<sup>[32]</sup>。随着衰落电平变大、衰落深度增加，圆极化方案的衰落时间明显少于 2 种线极化方案，这直接验证了圆极化方案的分集效果，尤其是抗深度衰落效果明显优于传统线极化方案。

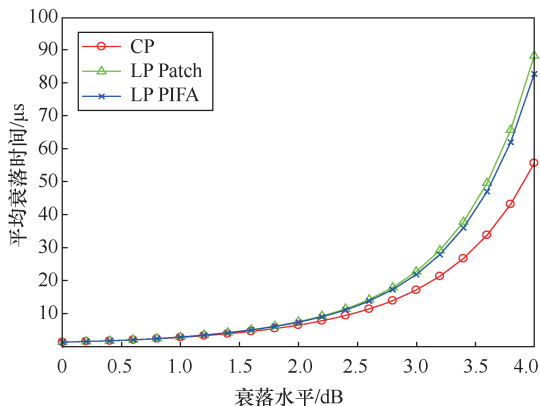
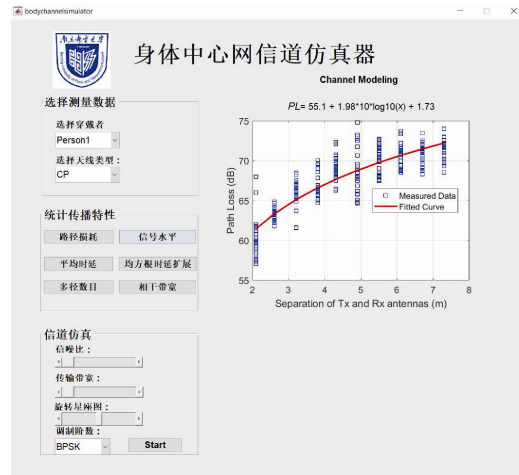


图 8 3 组方案在给定衰落水平下的平均衰落时间对比

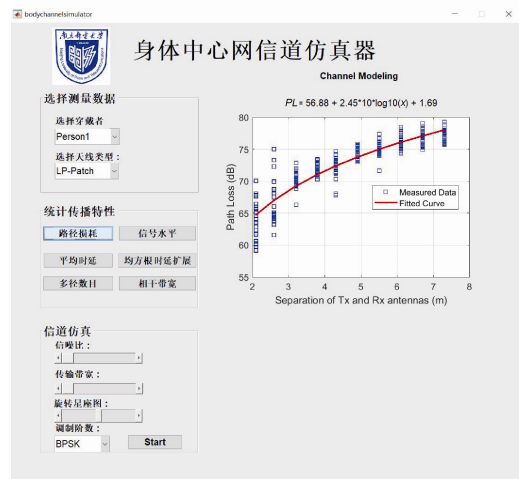
综合表 1 和图 3~图 8 的实测及建模分析结果，体域圆极化分集方案性能优于传统线极化分集方案，它可以显著降低时延扩展波动，提高接收增益，改善平均衰落时间，有效克服体域通信中常见的深度衰落现象。

### 3 信道仿真器设计及分析

在传播特性测量分析的基础上，构建身体中心网信道仿真器。该仿真器在架构上分为 3 个部分，1)数据库部分：用于组织数据结构，读取实验数据和保存实验结果；2)图形用户交互（GUI）部分：如图 9 和图 10 所示，用于操作、对比和分析；3)后台算法部分：用于生成传播特性及信道的统计模型、产生通信信号并仿真其在衰落信道中的性能。本仿真器将传播特性参数测量与显示、信道建模及通信信号仿真过程有机结合在一起，可以直观、方便而高效地为通信系统设计及性能评价提供支持。



(a) 圆极化方案路径损耗统计



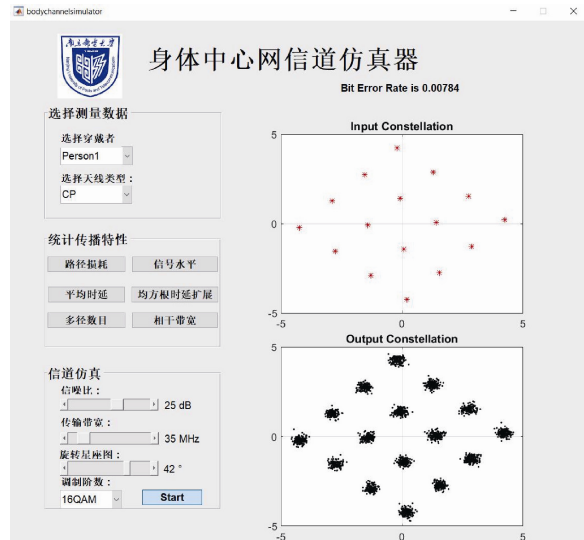
(b) 线极化Patch方案路径损耗统计

图 9 身体中心网信道仿真器的传播特性模块 GUI 界面展示

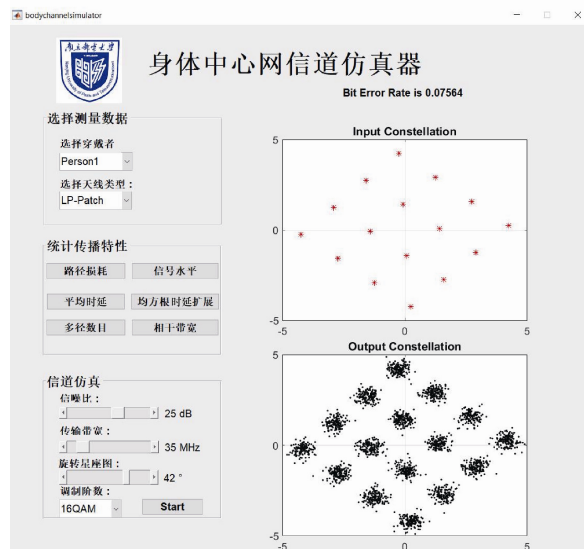
图 9 主要展示了身体中心网信道仿真器的传播特性模块下的 GUI 界面，用于对不同穿戴者和不同天线方案的场景下几个重要的传播特性进行统计分析和建模。图形上方实时给出路径损耗的计算式或分布参数的数值等信息，更细致的传播特性分析方法可以参考文献[13-18, 25-26, 28]。图 9(a)和图 9(b)分别展示了同一个穿戴者（编号为 Person1），分别采用圆极化和线极化分集接收的路径损耗分析结果。统计结果显示线极化方案的路径损耗值比圆极化大 2 dB 以上，功率损耗因子  $n$  比圆极化方案约高 0.4。上述结果说明，圆极化接收方案可以有效降低路径损耗因子，减少路径损耗。

图 10 的信道仿真界面展示了 2 种分集方案在信噪比为 25 dB、带宽为 35 MHz、星座图旋转 42° 条件下，真实体域衰落信道中传输 16QAM 信号的仿真结果。传输方案为 OFDM 制式，信噪比、传输带宽、调制阶数和星座图的旋转角均可自由配置。为了便于比较，同时显示了输入及输出星座图。对比图 10 结果可见，对于圆极化分集和线极化分集 2 种情况，同等设置条件下实时仿真的传输误码率分别为 0.78%和 7.56%，同时线极化方案的星座图也比圆极化方案的情况显著发散。这说明采用圆极化天线进行分集接收，确实更有利于降低误比特率、提高传输性能。更进一步的 OFDM 实现流程、参数配置等细节，可参考文献[29]。

图 11 展示了在仿真配置为 64QAM、信噪比为 25 dB、带宽为 50 MHz 下 3 种方案的传输误码率对比。为了确保结果可靠，对每种分集方案、每个穿戴者均进行 100 次实验求平均，充分消除偶发性因素影响。结果显示，采用线极化分集的情况下，系统误码率性能随人员变化呈现明显波动；而在圆极化分集的情况下，系统误码率性能对人体的依赖性明显降低，随人员变化仅呈现小幅度平坦变化，说明圆极化分集方案比线极化分集更有利于克服人员差异带来的衰落；此外，圆极化分集方案的系统误码率性能比线极化分集情况提升近一个数量级。上述结论充分说明体域圆极化分集接收方案的性能确实显著优于传统线极化方案，再次验证可穿戴天线的宽俯仰面波束和圆极化两大特征，可被有效用于克服深度衰落，显著提升体域通信系统的传输性能。



(a) 圆极化方案的仿真结果



(b) 线极化Patch方案的仿真结果

图 10 身体中心网信道仿真器的信道仿真模块 GUI 界面展示

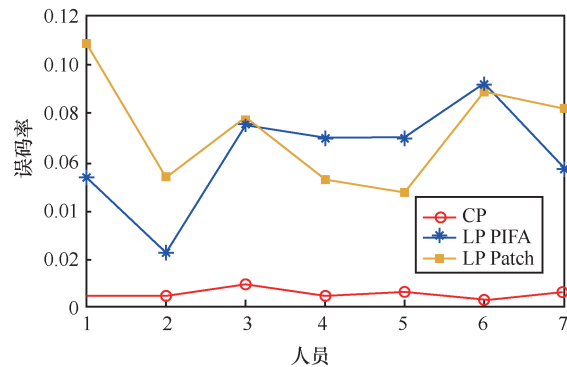


图 11 3 组方案的仿真误码率对比

### 4 结束语

本文提出了一种体域可穿戴圆极化天线分集

接收方法。利用平面端射圆极化天线固有的俯仰面宽波束特性(半功率波束宽度超过  $180^\circ$ ), 可以有效克服身高及姿态变化带来的幅度衰落; 另一方面, 利用圆极化特性能够有效减小多径均方根时延扩展波动, 消除因来波与接收天线极化失配而引起的深度衰落。实测与仿真结果表明, 采用平面端射圆极化天线作为可穿戴分集天线, 可显著改善体域信道的多径特性, 有效提高体域无线通信系统的传输性能。因此, 该方法有望用于解决新一代信息系统中末梢体域网与接入点之间的可靠互联问题, 为研制面向新一代信息系统的高性能物理层传输技术奠定理论与实践基础。

### 参考文献:

- [1] BURG A, CHATTOPADHYAY A, LAM K T. Wireless communication and security issues for cyber-physical systems and the Internet-of-Things[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2018, 106(1): 38-60.
- [2] KIM M, TAKADA J, CHANG Y, et al. Large-scale characteristics of urban cellular wideband channels at 11 GHz[C]//European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 2015: 1-4.
- [3] CAO H, LEUNG V, CHOW C, et al. Enabling technologies for wireless body area networks: a survey and outlook[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(12): 84-93.
- [4] HALL P S, RICCI M, HEE T M. Measurements of on-body propagation characteristics[C]//IEEE APS/URSI Antennas and Propagation Symposium. 2002: 310-313.
- [5] ALOMAINY A, HAO Y, HU X, et al. UWB on-body radio propagation and system modelling for wireless body-centric networks[J]. *IEEE Proceedings Communications*, 2006, 153 (1): 107-114.
- [6] FORT A, RYCKAERT J, DESSET C, et al. Ultra-wideband channel model for communication around the human body[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(4): 927-933.
- [7] AMBROZIAK S J, CORREIA L M, KATULSKI R J, et al. An off-body channel model for body area networks in indoor environments[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 2016, 64(9): 4022-4035.
- [8] GARCIA-SERNA R G, GARCIA-PARDO C, MOLINA-GARCIA-PARDO J M, Effect of the receiver attachment position on ultra-wideband off-body channels[J]. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 1101-1114.
- [9] ALI A J, COTTON S L, SCANLON W G. Spatial diversity for off-body communications in an indoor populated environment at 5.8 GHz[C]//Antennas and Propagation Conference. 2009: 641-644.
- [10] COTTON S L, SCANLON W G. Measurements, modeling and simulation of the off-body radio channel for the implementation of body worn antenna diversity at 868 MHz[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 2009, 57(12): 3951-3961.
- [11] WANG Y, LU W J, ZHU H B. Propagation characteristics of the LTE indoor radio channel with persons at 2.6 GHz[J]. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 2013, 12: 991-994.
- [12] GARCIA-SERNA R G, GARCIA-PARDO C, MOLINA-GARCIA-PARDO J M. Effect of the receiver attachment position on ultra-wideband off-body channels[J]. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 1101-1104.
- [13] CUI P F, YU Y, LU W J, et al. Measurement and modeling of wireless off-body propagation characteristics under hospital environment at 6-8.5 GHz[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 10915-10923.
- [14] YU Y, LIU Y, LU W J, et al. Path loss model with antenna height dependency under indoor stair environment[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2014, 2014(6): 1-6.
- [15] LIU Y, YU Y, LU W J, et al. Antenna-height-dependent path loss model and shadowing characteristics under indoor stair environment at 2.6 GHz[J]. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2015, 10(5): 498-502.
- [16] YU Y, LIU Y, LU W J, et al. Antenna-height dependent delay spread model under indoor stair environment for small cell deployment in future mobile communications[J]. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2015, 10(S1): S7-S13.
- [17] YU Y, CUI P F, LU W J, et al. Off-body radio channel impulse response model under hospital environment: measurement and modeling[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(11): 2332-2335.
- [18] YU Y, LIU Y, LU W J, et al. Propagation model and channel simulator under indoor stair environment for machine-to-machine applications[C]//Asia Pacific Microwave Conference (APMC). 2016: 1-3.
- [19] SUN S, MACCARTNEY G R, RAPPAPORT T S. A novel millimeter-wave channel simulator and applications for 5G wireless communications[C]//IEEE International. Conference Communications (ICC). 2017: 1-5.
- [20] GEORGIU O. Polarized rician fading models for performance analysis in cellular networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(6): 1255-1258.
- [21] JIANG Z H, CUI Z, YUE T, et al. Compact, highly efficient, and fully flexible circularly polarized antenna enabled by silver nanowires for wireless body-area networks[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2017, 11(4): 920-932.
- [22] JIANG Z H, GREGORY M D, WERNER D H. Design and experimental investigation of a compact circularly polarized integrated filtering antenna for wearable biotelemetric devices[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2016, 10: 328-338.
- [23] LU W J, SHI J W, TONG K F, et al. Planar end-fire circularly polarized antenna using combined magnetic dipoles[J]. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 1263-1266.
- [24] ZHANG W H, LU W J, TAM K W. A planar end-fire circularly polarized complementary antenna with beam in parallel with its plane[J].

- IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(3): 1146-1152.
- [25] XUE B, YOU M, LU W J, et al. Planar endfire circularly polarized antenna using concentric annular sector complementary dipoles[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2016, 26(9): 829-838.
- [26] YOU M, LU W J, XUE B, et al. A novel planar endfire circularly polarized antenna with wide axial ratio beamwidth and wide impedance bandwidth[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 6(10): 4554-4559.
- [27] RAPPAPORT T S HAWBAKER D A. Wide-band microwave propagation parameters using circular and linear polarized antennas for indoor wireless channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 1992, 40(2): 240-245.
- [28] CUI P F, LU W J, YU Y, et al. Off-body spatial diversity reception using circular and linear polarization: measurement and modeling[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(1): 209-212.
- [29] 薛白. 穿戴式平面圆极化天线分集接收方法的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.
- XUE B. Study on method of diversity reception with wearable planar circularly polarized antennas[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017.
- [30] ALTMAN F, SICHAK W. A simplified diversity communication system for beyond-the-horizon links[J]. IRE Transactions on Communications Systems, 1956, 4(1): 50-55.
- [31] BRENNAN D G. Linear diversity combining techniques[J]. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(2): 331-359.

- [32] RAPPAPORT T S. Wireless communications: principles and practice, upper saddle river, NJ: prentice. hall[M]. Chichester: Horwood Publishing Limited Chichester, 2002.

### [作者简介]



吕文俊 (1978-), 男, 南京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为天线理论与设计、无线信道测量与建模。



崔鹏飞 (1990-), 男, 南京邮电大学博士生, 主要研究方向为体域网和无线信道测量与建模。



朱洪波 (1956-), 男, 南京邮电大学教授、博士生导师, 江苏省无线通信重点实验室主任, 主要研究方向为无线通信理论和物联网。