

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104602

# 超宽带信号在运动人体下阴影衰落对通信性能的影响\*

车克龙 廖 薇 周灵丽

(上海工程技术大学电子电气工程学院 上海 201620)

**摘 要:**超宽带信号在人体通信技术中具有低功耗、抗衰减等优势。针对人体信道建模工作中阴影衰落与运动状态关联性的问题,文章基于人体不同运动姿态与组织电磁特性建立人体模型,分析超宽带信号下的动态人体信道阴影衰落特性。首先,通过建立 80 条数据传播链路分析人体不同状态下的体表传播特性,给出了一种体表传播距离与路径损耗的二阶指数衰减关系。其次,分析了动态模型组织电特性变化对路径损耗的影响情况。最后,使用平均误码率研究了 UWB 系统在动态阴影衰落下的性能差异。结果表明,在动态人体模型下 UWB 频段的抗损耗性能优于 HBC 频段,其阴影衰落强度受运动状态影响程度强于 HBC 频段。研究对超宽带信号在人体通信的建模、应用工作中提供了动态人体阴影衰落强度分布的理论基础。

**关键词:**人体通信;路径损耗;动态模型;通信性能

**中图分类号:** TN911      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## Influence of shadow fading of UWB signal under moving human body on communication performance

Che Kelong Liao Wei Zhou Lingli

(School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** Ultra-wideband signals have the advantages of low power consumption and anti-attenuation in human body communication technology. Aiming at the problem of the correlation between shadow fading and motion state in the human body channel modeling work, this article establishes a human body model based on the human body's different motion postures and the electromagnetic characteristics of tissues, and analyzes the dynamic human body channel shadow fading characteristics under ultra-wideband signals. First, by establishing 80 data transmission links to analyze the body surface propagation characteristics of the human body in different states, a second-order exponential attenuation relationship between body surface propagation distance and path loss is given. Secondly, the influence of changes in the electrical characteristics of the dynamic model organization on the path loss is analyzed. Finally, the average bit error rate is used to study the performance difference of UWB system under dynamic shadow fading. The results show that the anti-loss performance of the UWB frequency band under the dynamic human body model is better than that of the HBC frequency band, and the intensity of shadow fading is affected by the motion state more than the HBC frequency band. The research provides a theoretical basis for dynamic human shadow fading intensity distribution in the modeling and application of ultra-wideband signals in human body communication.

**Keywords:** human body communication; path loss; dynamic model; communication performance

## 0 引 言

人体通信技术是在体域网的基础上,电子设备采取符合 IEEE 802.15.6-2012 标准的人体可用频段进行数据

交互的技术。技术可以建立更加高效安全的人体传感网络作为人体的第二皮肤,实现物联网技术中数据至人的最后一步。在目前的研究中,常用频段包括 HBC (10~50 MHz)、UWB (3.1~10.6 GHz)、MICS、ISM 等<sup>[1-3]</sup>。超宽带信号一般为相对带宽大于 20%~25%的信

号,由于在低功耗、抗衰减等方面具有优势,因而在人体医疗方向有使用潜力。其在 GHz 频段由于收发系统复杂度低且信道衰落敏感性低故在精确定位领域得到了较好的发展。在人体通信领域超宽带信号由于功耗与功率谱密度低而具有良好应用潜力。由于 HBC 与 UWB 信号均符合定义标准,本文针对两种频段研究其人体信道阴影衰落特性。在 UWB 频段内,为移除局域网 5 GHz 频段而被划分为低频段(3.1~4.8 GHz,  $UWB_{LOW}$ )与高频段(6.0~10.2 GHz,  $UWB_{HIGH}$ )。HBC 频段的中心频率较低,其于人体传播机理异于 UWB 频段,具有低辐射、高安全性的特点。在医学人体传感网络也具有较好的应用背景<sup>[4-6]</sup>。

人体通信技术研究方向广泛,目前,在商业应用的方向有触摸交互(支付、名片、图像、影音的数据传输)、智能家居、设备-体感控制等;在医疗健康方面有生理健康参数监测、远程安全检测、老年家庭医疗等方向<sup>[7-8]</sup>。

文献[9]针对跑步运动对体域网通信的稳定性影响进行研究,建立了一种信道数字模型。模型对信号的多径分布特性给出数字拟合方案,对跑步姿势对信号传播稳定的影响程度给出了判断方法。文献[10]进一步对 UWB 全频段下非直接信号的传播特性进行信道建模。文献[11]针对智慧医疗的微型化、远程诊断、资源匮乏、个性化健康预测等问题。使用容性耦合 HBC 技术以人体为介质进行无线通信,搭建等效电路模型与全波分析对系统进行研究,提出使用可穿戴天线建立非侵入式健康监测体域网的解决方案。

在文献[12-13]中,中国科学院自动化研究所,研究人体区域通信的团队对可穿戴电子设备在体域网中的与其他传感设备在干扰与兼容问题上提出身体节点可能的通信方案以避免通信间冲突。文献[14-15]同时针对可穿戴设备在实际应用中面临的设计挑战并回顾先进的解决方案,同时指出有限元分析在人体区域通信的电磁分析过程中具有相交电路模型更加精确便捷的优势。

人体信道特性受到性别、体格、结构、体脂率等多种人体特性的影响,尤其对姿势动作具有更高的敏感度,目前缺少对超宽带信号在动态人体通信建模的研究。因此,文章针对  $UWB_L$ 、 $UWB_H$ 、HBC 3 种频率范围的超宽带信号,通过对人体磁共振成像(MRI)数据进行数字建模,研究信号在不同人体运动状态下的阴影衰落特性。对信号路径损耗沿人体表面的分布数据建立了包含阴影衰落特性的路径损耗模型。针对不同状态的人体模型,研究其阴影衰落强度变化。对阴影衰落影响下的信道在 UWB 通信系统中,分析其误码率性能。同时考虑动态人体模型在实际情况下的影响因素,建立了基于潮湿皮肤的运动姿态模型,分析动态因素对模型所造成的影响与原因。

## 1 人体模型的建立

### 1.1 人体的电磁特性

本文使用数字人体模型模拟真实人体进行电磁分析。模型基于磁共振成像技术采集的人体截面切片的灰度图像数据建立,其数据来源于日本情报通信研究机构(NICT)。构成模型的立方体单元尺寸为  $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。人体模型参数参考亚洲成年男性生理参数的统计平均值,年龄 33 岁,胸围 78 cm,体重 65 kg,身高 169 cm。数字模型包含人体多种组织类型,如肌肉、皮肤、细胞等。人体电磁特性依赖于组织的介电特性,组织介电常数一般与其含水量相关。在所研究频段,对人体模型影响较大的成分主要为肌肉与皮肤组织。描述生物组织的介电特性及电导率可以使用式(1)的德拜(Debye)近似式<sup>[16]</sup>。

$$\dot{\epsilon}_r(\omega) = \epsilon_\infty + \chi(\omega) + \frac{\sigma_0}{j\omega\epsilon_0} \quad (1)$$

式中: $\epsilon_r$  为介电特性参数,是一种可以表征人体介电特性的频率函数; $\epsilon_\infty$  和  $\epsilon_0$  分别是频率区域无穷大时和自由空间下的介电常数; $\chi(\omega)$  表示频域磁化指数; $\sigma_0$  为零频离子电导率。

人体在不同频率下所表现出的电磁特性也具有差异。为了简化建模,模型组织的电磁特性的选取标准为研究信号的中心频段。由于人体肌肉组织的介电常数以及电导率数值的 2/3 对人体平均介电特性参数具有很好的近似效果,因此在所研究的 MHz 频段下,选定其数值作为人体模型内所有组织的电磁参数。在 GHz 频段中,由于电磁分析的人体模型参数由于透入深度小,因此可以将模型设置为均质皮肤模型,并且可以忽略内部器官的外形和电磁特性差异。在建立动态模型时,由于 GHz 频段下人体模型为均值皮肤模型,而皮肤是在运动状态下的电磁特性易受影响,因此皮肤组织的电磁特性对研究结果可能具有更高的关联性。为充分考虑人体运动状态的复杂性,还研究了具有流汗特征的人体模型,分析皮肤组织电磁特性变化对测量结果的影响。综上所述,本文建立了多种模型以研究超宽带信号在不同频段下的传输特性,并分析了阴影衰落变化情况。

### 1.2 动态模型的建立

基于人体组织的电磁特性建立人体模型后,为研究不同运动状态下的人体姿势对人体阴影衰落的影响,需要对人体模型姿势进行调整。姿势的选取方法参考了文献[17]中对身体活动分类,同样对 4 种运动状态:立、走、跑、坐中,各分类中选取高频率姿势作为研究中的人体状态,最终模型如图 1 所示。使用多姿态人体模型进行不

同人体状态的模拟,可以分析出运动人体对传输信道传输特性发生的影响。在建立路径损耗模型时,增加了模型的可靠性。

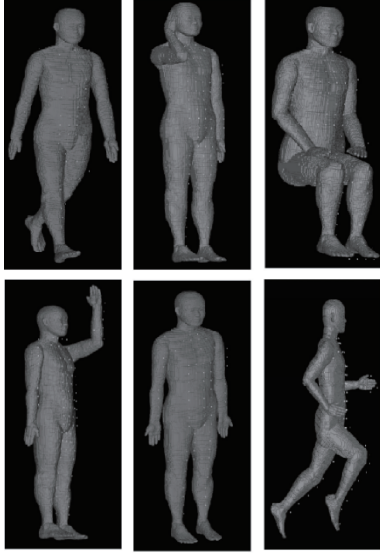


图1 几种具有特点的人体姿势

Fig. 1 Several characteristic human postures

为研究人体阴影衰落的特性,首先应对人体表面超宽带信号传播的路径损耗特性进行分析。本文在人体体表搭建了80条链路,通过统计链路损耗情况以建立路径损耗模型。收发机位置的选取参考实际生活中人体常佩戴传感器的应用环境,主要分布在模型中的胸、腿、手臂。模型上布置了单个发射天线位于左胸,向外发散多条链路。多个接收机放置于整个身体,沿体表间距10 cm分布,形成完整的体表链路较完整的覆盖了人体。在放置过程中考虑到实际环境下电极与人体可能存在的衣物间隔,因此电极放置于皮肤正上方2 mm处作为研究超宽带信号的收发机。电磁波信号沿人体表面传输,因此在统计信号的通信距离时,实际测量了收发机间的皮肤轮廓长度。

## 2 动态阴影衰落研究

### 2.1 超宽带信号在人体动态模型中的传输特性

超宽带信号在人体传播时主要介质为人体组织与近体表空间。故而区别于无线通信,电磁波在人体区域受到的影响来自电极、组织电磁特性、人体姿态等各种因素。研究体表链路特性时,使用时域有限差分(FDTD)电磁分析方法结合生物组织介电特性,对人体表面路径损耗特性进行了数值分析,得到了人体表面信号在体表传播的传播特性。根据式(1)可以获得时域下的电通量密度与电流密度。

$$D(t) = \varepsilon_0 \varepsilon_{\infty} E(t) + \varepsilon_0 \chi(t) * E(t) \quad (2)$$

$$J_0(t) = \sigma_0 E(t) \quad (3)$$

式中: $D(t)$ 表示电通量密度, $J_0(t)$ 表示电流密度, $E$ 表示电场强度,\*表示卷积, $\varepsilon$ 为介电参数, $\chi$ 表示磁化指数。

借助式(2)、(3)和麦克斯韦方程可以使用频率相关下的FDTD方法分析人体表面链路传播特性。路径损耗包含信道各种不确定性条件的影响,其中包含了人体姿态、组织电磁特性等多种因素。建立动态损耗模型是为分析动态人体的阴影效应提供基础。无线通信下路径损耗一般由式(4)表示<sup>[18]</sup>。

$$PL_{dB} = 10n \lg(d) + C \quad (4)$$

式中:路径损耗以 $PL_{dB}$ 表示、 $d$ 表示收发机间的传播距离、 $n$ 表示损耗指数、 $C$ 表示系统损耗常量。

本文使用FDTD数值计算方法,研究了80条体表链路在不同频段下的电磁特性,并将路径损耗进行对比研究。同时,为研究人体的动态性对路径损耗的影响,对多种人体可能出现的运动姿态,分别测量了链路损耗。图2表示了信号沿人体传播时单位长度下的路径损耗均值,并对比了标准站立静态人体模型与运动模型的差异,测量结果由每个模型的80条胸腔通信链路路径损耗数值平均得出,并对比了UWB与HBC频段的差异。

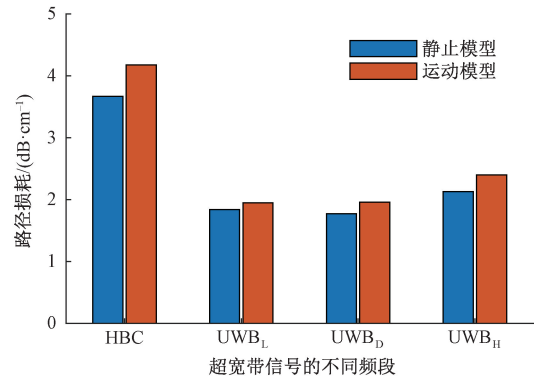


图2 单位长度平均路径损耗

Fig. 2 Average path loss per cm

在UWB频段中,低频段(UWB<sub>L</sub>)相较高频段(UWB<sub>H</sub>)更适合体表通信。与HBC频段相比,UWB<sub>L</sub>也具有更低的路径损耗性能。可能的原因是人体作为有耗介质,体表传播机理会由于频段差异而导致路径损耗均值存在差异。在UWB频段下,接收信号中的表面分量大于HBC频段,因此路径损耗会普遍低于HBC频段。在人体动态模型中,信道受到的损耗在两种频段都会相较静态人体模型显著增加。

人体的不同动作会导致不同的阴影区域生成,对电磁波存在吸收与散射现象会影响信号的衰减情况。此外,姿势导致的多径效应也会导致接收的复合信号发生



畸变,因此认为阴影区域发生改变是路径损耗增加的主要原因。图 3 显示了信号传输时 HBC 频段与 UWB 低频段的平均路径损耗及其标准偏差。对于 UWB 信号,在人体环境传播平均损耗约为 58 dB,但是标准偏差对姿态变化的敏感程度要强于 HBC 频段,在动态姿态下,路径损耗的波动增加明显。且奔跑状态具有最大的路径损耗波动。

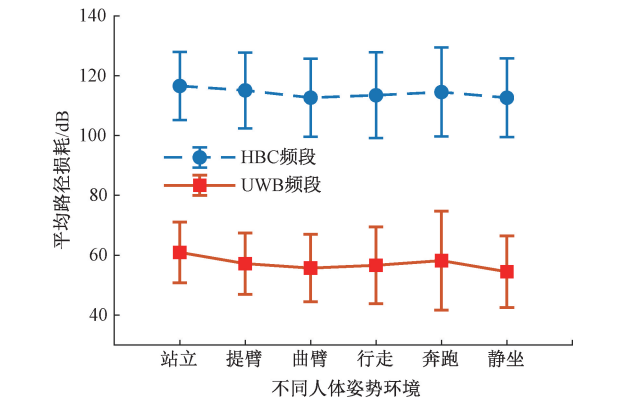


图 3 人体不同姿势下链路平均路径损耗

Fig. 3 Average path loss in different postures of human body

2.2 动态人体模型的影响因素

考虑到人体动态模型中皮肤浸润情况较为普遍,且超宽带信号通信时由于透入深度只有几毫米。因而皮肤作为主要传播媒介,其电磁特性发生的改变对信号的影响不可忽略。受汗水影响下皮肤不再干燥,在表 1 给出的数据中电导率在两种条件下的差异范围在 12.6%~21.4%,介电常数的变化程度达-41.2%~10.5%。针对这种情况,本文通过建立潮湿皮肤人体模型来进行信号通信路径损耗测算来分析 UWB 频段受到的影响。

表 1 人体模型建立参考组织电磁特性

Table 1 Tissue electromagnetic properties of human body model

组织	频率/MHz	电导率/(S·m <sup>-1</sup> )	相对介电常数
肌肉	30	0.658 03	91.812
肌肉	3 950	2.967 9	50.884
肌肉	8 100	7.935	45.36
皮肤(潮湿)	30	0.434 44	108.33
皮肤(潮湿)	3 950	2.660 8	40.91
皮肤(潮湿)	8 100	6.786 5	35.8
皮肤(干燥)	30	0.341 68	152.94
皮肤(干燥)	3 950	2.307 5	36.628
皮肤(干燥)	8 100	5.928 6	33.092

本文对超宽带的低频段进行对比测试,结果数据如表 2 所示。潮湿状态下的皮肤可以对信号传输造成积极影响,本文认为由于潮湿皮肤比干燥皮肤具有更加合适的电磁特性,因此在静态人体模型中发现信号路径损耗

相较干燥人体模型下降 3.8%。但是在动态模型中,皮肤由于潮湿而导致的电磁特性变化应降低路径损耗,结果未有明显的损耗下降。可能的原因是由于运动过程的不同姿势造成的信道产生的阴影效应强度发生改变,进而导致人体动态模型中路径损耗发生明显变化。但是模型电磁特性变化而对路径损耗的影响较小,只成为损耗突变的次要因素,因此在动态模型下观测皮肤状态对路径损耗的影响时结果不明显。

表 2 UWB 频段下人体汗水对路径损耗的影响

Table 2 The influence of sweat on path loss under UWB

单位路径损耗/(dB·cm <sup>-1</sup> )	静止状态	运动状态
干燥状态	1.84	1.95
潮湿状态	1.77	1.96

2.3 动态人体阴影衰落特性

本文通过建立动态损耗模型分析了人体运动产生的阴影效应。平均路径损耗特性表明人体模型下信号传输整体情况,但无法精确反映出路径损耗随距离变化而产生的变化。为分析出更为合理的人体信号传输情况,有必要对人体表面路径损耗进行数学建模代替对数路径损耗模型。为估计非线性静态模型的参数,使用非线性最小二乘法为准测对模型建模,得到一种二阶指数拟合的路径损耗模型。在对比在路径损耗模型中常用的其他拟合方式后,得出二阶指数衰减模型更加符合路径损耗变化规律,其具有更高的确定系数(R-square: 0.926 3)。因此在式(2)的基础上,改进的动态人体模型下的路径损耗模型如式(3)所示。

$$PL_{dB} = PL_{f,dB} + S_{dB} \tag{5}$$

$$PL_{f,dB} = Ae^{\alpha d} + Be^{\beta d} \tag{6}$$

式中: $S_{dB}$  是随机波动,由人体阴影区域导致; $A$ 、 $B$  为激励系数; $\alpha$ 、 $\beta$  为衰减指数。

对不同人体模型下信号路径损耗进行测量,数值与体表传播距离的拟合结果如图 4、5 所示。可以看出所提出的二阶指数规律在所有的姿态模型都有较好的拟合,对静态模型测量结果的拟合最优。该模型描述人体体表信道较为精确,为进一步描述人体环境的阴影衰落提供了分析基础。

式(5)的路径损耗模型中体现出人体的阴影衰落对路径损耗的影响,影响强度需要通过对信道内的路径损耗统计得出。本文对 UWB 低频段的静态与动态人体模型中的阴影衰落绘制出累积分布函数以获取阴影衰落标准差,拟合结果如图 6 所示。阴影衰落符合正态分布,模型中标准差的大小代表阴影衰落强度。建立动态人体模型的阴影衰落是分析人体信道下信号传播性能的基础。

图 7 综合超宽带信号中 UWB 频段与 HBC 频段各种姿态下的阴影衰落强度,得到阴影衰落的分布范围与变

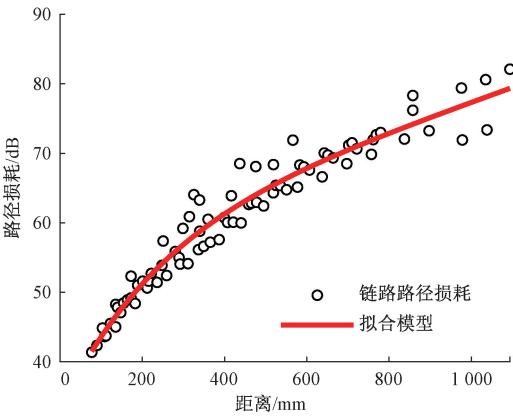


图4 UWB频段对人体模型进行路径损耗与距离拟合  
Fig. 4 Static model under UWB for path loss and distance fitting

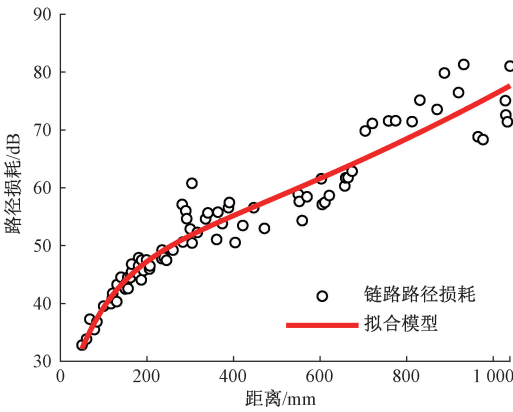


图5 UWB频段对动态模型进行路径损耗与距离拟合  
Fig. 5 Dynamic model under UWB for path loss and distance fitting

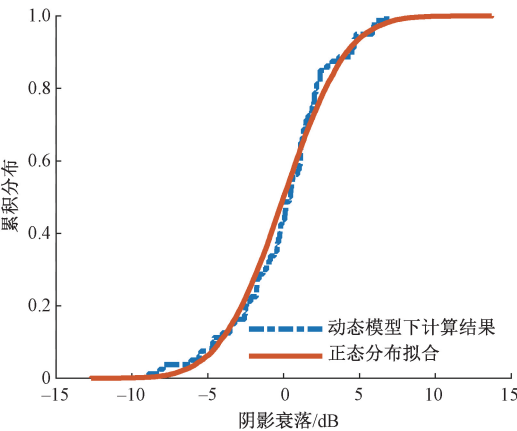


图6 基于路径损耗模型的动态模型阴影衰落累积分布  
Fig. 6 Dynamic model shadow fading cumulative distribution

2.24~3.50 dB。在动态人体模型中阴影衰落标准差为2.31~12.70 dB。进一步证明动态模型中路径损耗相对静态模型变化的主要因素为人体的阴影区域的变化。因此,在静态模型中两种频段阴影衰落性能效果相似。在HBC频段下,静态模型下阴影衰落(2.24 dB)与动态模型的阴影衰落(均值3.34 dB)相差较小;UWB频段下,低频段和高频段的整体变化趋势相同,但是高频的阴影衰落性能弱于低频段。可以看出在动态模型中,受人体动作的影响阴影效应发生显著的变化。

造成这种现象的原因可能因为电磁波的透入深度随频率逐渐降低。而较低频段的信号分量中,人体传播成分较GHz频段更多,因此受体表阴影区域的影响程度小于GHz频段,故而在两种频段的对比下,得出对运动导致的体表阴影区域变化的抗性上HBC频段具有优势。这表明在动态人体环境下UWB频段的通信效果受到的影响要大于HBC频段。

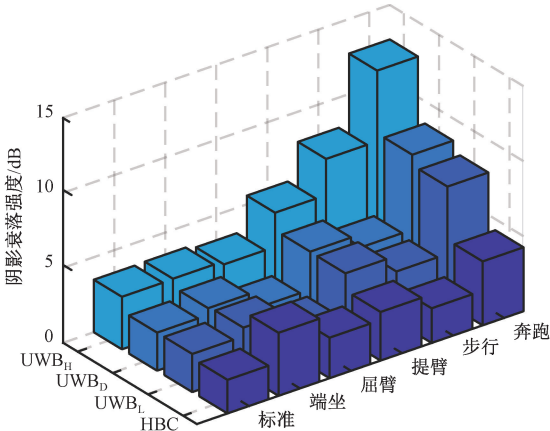


图7 超宽带信号在姿态变化时的阴影衰落强度  
Fig. 7 The intensity of the shadow fading of the signal when the attitude changes

此外在对动态模型影响的其他因素中,图7显示UWB频段下潮湿皮肤模型的测算结果与干燥皮肤模型相比,平均相差小于4%。证明潮湿皮肤对信号传播路径损耗的影响和阴影衰落的影响都足够小,在建模时可以忽略皮肤的潮湿引起的电磁特性变化影响。

### 3 通信性能影响

动态人体模型下的信号传播模型表明了阴影衰落特性的分布规律,建模工作对通信系统的性能影响带来了分析基础。使用平均误码率表征UWB系统的通信性能。在提出的二阶指数衰减模型中,对所有状态人体路径损耗均有较好的拟合效果,故利用累积分布函数计算阴影衰落的标准差,式(5)中 $S_{ab}$ 代表信道的阴影效应。求解

动态人体模型的平均误码率评估系统性能,平均误码率的表达式由式(3)给出<sup>[19]</sup>。

$$P_b(\overline{\gamma}) = \int P_0(\gamma)p(\gamma) d\gamma \tag{7}$$

式中: $P_b(\cdot)$ 表示在人体阴影衰落效应下的系统平均误码率, $\gamma$ 表示 SNR、 $P_0(\cdot)$ 表示加性高斯白噪声下的系统 BER、 $p(\cdot)$ 表示 SNR 概率密度函数。

分析动态人体的阴影衰落信道对通信质量的影响,式(4)的信噪比概率密度函数符合由人体结构、姿态所决定的特定统计分布,可由如下步骤推导:

1)在提出的二阶指数衰减模型下,得到  $S_{db}$  分布以及标准差。

2)由式(6)的拟合模型和  $S_{db}$  推导出  $PL_{db}$  服从正态分布。

3)由  $PL$  的统计特性分析  $E_b/N_0$  分布特性和 SNR 的概率密度。

4)SNR 的概率密度结合调制方式通过数值积分由式(8)获得人体不同状态信道下的平均误码率曲线。

$$P_b(\overline{\gamma_m}) = \sum_{n=1}^N P_0(\gamma_n)P_m(\gamma_n)(\gamma_n - \gamma_{n-1}) \tag{8}$$

式中: $\gamma$ 为信噪比, $m=1,2,3,\cdots$ , $P_m(\cdot)$ 表示  $\gamma_m$  的概率密度函数,方程进行离散化便于计算。

对于 IR-UWB 信号,系统采用 PPM 和 PAM 方式进行脉冲调制。对动态和静态人体信道模型下的系统性能和高斯信道分别进行了分析,结果如图 8、9 所示。当误码率为  $10^{-3}$  时,系统性能受人体阴影效应影响下降 3 dB。在动态人体模型下系统性能如图 9 所示,系统性能下降比静态模型十分明显,表明 UWB 系统中对人体信道建模需要充分考虑运动状态导致信道阴影效应的影响。

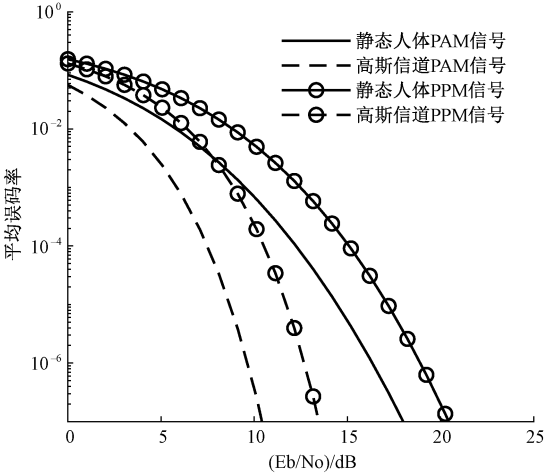


图 8 静态人体信道与 AWGN 信道中 UWB 系统的性能  
Fig. 8 Static body and UWB system performance in AWGN

在静态人体模型中导致系统误码率性能下降的原因主要考虑为信号在人体表面传播时,电磁波被人体吸收

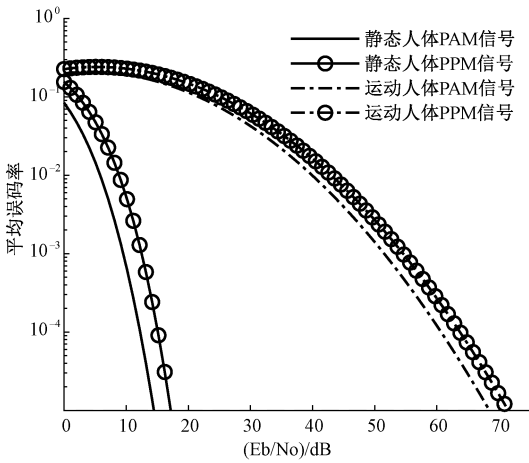


图 9 动态与静态人体信道 UWB 系统的性能  
Fig. 9 Dynamic and static human channel  
UWB system performance

与介质损耗导致。但是在动态人体模型中使误码率下降的程度远大于静态模型,可能的原因是人体姿势的阴影区域变化导致的信号发生多径效应,引起接收机处信号畸变情况严重,这种情况的本质是人体皮肤空间位置的变化导致信道质量的下降。

关于 UWB 的低频段和高频段、HBC 频段中,奔跑模型下系统阴影衰落的强度与标准模型的对比结果数据如表 3 所示。这种模型下系统的误码率下降最明显,阴影衰落的强度也是所有非静态模型中最强的。因此认为在动态人体模型下,阴影衰落参数发生的变化足够重要,需要引入到路径损耗模型中。这种情况尤其针对 UWB 频段的信号。HBC 频段信号由结果发现,阴影衰落受模型姿态的影响程度较低,可以用静态人体模型简化表征动态人体的信号传输情况。此外潮湿皮肤人体模型在动态姿势中对结果的影响达 7%,在静态模型中区别小于 1%。

表 3 超宽带信号在不同状态下的阴影衰落强度

Table 3 Shadow fading intensity of UWB signals in different states

阴影衰落/dB	标准	跑步
HBC	2. 31	4. 38
4G	2. 24	9. 43
4GDamp	2. 26	10. 16
8G	2. 67	14. 28

4 结 论

本文通过对人体进行动态建模,使用电磁数值仿真来分析各种状态人体信道的阴影衰落特性。通过计算人体表面超宽带信号的路径损耗分布,建立了一种基于运

动的二阶指数衰减路径损耗模型,对各种运动状态下人体模型的阴影衰落累计分布函数进行拟合。结果表明频率的增加使人体阴影衰落强度对系统的影响更加敏感。在 UWB 系统下分析了信号传输的性能影响,针对运动对人体组织电磁特性的影响,建立了潮湿皮肤人体模型。在动态人体模型下传播介质电参数变化对信号的影响性能小于 5%,认为动态模型中信号传输损耗的主要影响因素为阴影衰落。本文对平均路径损耗进行对比,运动会增加信号传播 10% 的路径损耗,UWB 信号路径损耗往往低于 HBC 频段。在二阶指数路径损耗模型下,其阴影衰落符合正态分布规律。由于 HBC 频段中动态模型下阴影衰落变化不明显,因此信号的抗阴影衰落性能强。本文认为由于 HBC 信号具有更高的透入深度,从而使其具有较高的稳定性。而在 UWB 频段,其阴影衰落强度与人体姿势呈现强相关性,在人体区域进行信道建模需要对人体状态进行充分考虑。最后,针对 UWB 系统的 PPM 和 PAM 两种调制条件,本文比较了人体不同状态下的平均误码率性能。在静态模型中系统性能下降较小(约 3 dB),在运动状态下系统性能恶化明显,而 HBC 频段下人体在运动状态时系统无明显性能恶化。

本文研究了超宽带信号不同频段在人体运动状态变化时的阴影衰落特性,对人体信道建模提出了一种路径损耗模型,考虑到了运动对阴影衰落的影响。在未来工作方向上可以针对不同人群、以及个体体质的差异性来对信道的影响进行研究,研究为超宽带信号在人体通信的建模、应用中提供了动态人体阴影衰落强度分布的理论基础。

## 参考文献

- [1] LIU J, SHAO Y, LUO J, et al. On-body channel characteristics based on variation of human tissue properties [C]. 2019 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). IEEE, 2019:1-3.
- [2] JIANQING W, QIONG W. Body Area Communication Performance [M]. Body Area Communications: Channel Modeling, Communication Systems, and EMC. IEEE, 2012: 181-221.
- [3] HUSSAIN S, MUNIR W. UWB BAN antennas: Recent trend and developments [C]. 2017 International Conference on Communication, Computing and Digital Systems (C-CODE). IEEE, 2017: 86-89.
- [4] 潘喜福, 滕召胜, 张甫, 等. 基于肌电和肌阻抗的吞咽信号同步测量方法 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 178-186.  
PAN X F, TENG ZH SH, ZHANG F, et al. Synchronous measurement method of swallowing signal based on electromyography and muscle impedance [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10): 178-186.
- [5] 蒋留兵, 李骢, 车俐. 利用二维小波包分解实现超宽带雷达人体动作识别 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(8): 69-75.  
JIANG L B, LI C, CHE L. Using two-dimensional wavelet packet decomposition to realize ultra-wideband radar human motion recognition [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(8): 69-75.
- [6] 周倩, 孙运强, 姚爱琴, 等. 基于人体关节点定位的步态识别技术研究 [J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(1): 52-56.  
ZHOU Q, SUN Y Q, YAO AI Q, et al. Research on gait recognition technology based on human joint point positioning [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(1): 52-56.
- [7] 任晶秋, 蒋杨, 张光华. AHRS 的老人跌倒检测算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(12): 190-196.  
REN J Q, JIANG Y, ZHANG G H. Elderly fall detection algorithm based on AHRS [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(12): 190-196.
- [8] 康桂英. 人体通信技术发展研究综述 [J]. 信息记录材料, 2020, 21(3): 18-19.  
KANG G Y. A review of research on the development of human body communication technology [J]. Information Recording Materials, 2020, 21(3): 18-19.
- [9] 王紫阳, 廖薇. 运动中人体信道数学模型研究 [J]. 软件导刊, 2020, 19(11): 75-78.  
WANG Z Y, LIAO W. Research on the mathematical model of human body channel during exercise [J]. Software Guide, 2020, 19(11): 75-78.
- [10] WANG Z, LIAO W. Study on non-direct signal transmission and characteristic of human body communication [C]. 2019 3rd International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering (EITCE). IEEE, 2019: 510-513.
- [11] 朱小奇. 无线体域网中可穿戴天线和容性耦合人体通信研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018.  
ZHU X Q. Research on wearable antenna and capacitively coupled human body communication in wireless body area network [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [12] MAO J. Investigating on the interferences on human body communication system induced by other wearable devices [C]. 2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC).



- IEEE, 2019: 4044-4047.
- [13] ZHAO B, MAO J, ZHAO J, et al. The role and challenges of body channel communication in wearable flexible electronics [J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2020, 14 (2): 283-296.
- [14] MAO J, WANG W, DING G, et al. Live demonstration: Wearable body area network system based on low power body channel communication[C]. 2019 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS). IEEE, 2019: 1.
- [15] GUEMBE I P, LOPEZ-ITURRI P, ASTRAIN J J, et al. Basketball player on-body biophysical and environmental parameter monitoring based on wireless sensor network integration [J]. IEEE Access, 2021, 9: 27051-27066.
- [16] JIANQING W, QIONG W. Electromagnetic Characteristics of the Human Body [M]. Body Area Communications: Channel Modeling, Communication Systems, and EMC. IEEE, 2012: 21-53.
- [17] WANG Q, TAYAMACHI T, KIMURA I, et al. An on-body channel model for UWB body area communications for various postures [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(4): 991-998.
- [18] JIANQING W, QIONG W. Body Area Channel Modeling [M]. Body Area Communications: Channel Modeling, Communication Systems, and EMC. IEEE, 2012: 89-142.

- [19] CHAISANG A, PROMWONG S. Optimization of HB-UWB transmission waveform for BAN applications[C]. 2018 Global Wireless Summit (GWS). IEEE, 2018: 315-318.

## 作者简介



**车克龙**, 2019 年于洛阳师范学院获得学士学位, 现为上海工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为人体区域通信及生物电磁学。  
E-mail: chekelong@qq.com

**Che Kelong** received his B. Sc. degree from Luoyang Normal University in 2019. He is currently a M. Sc. candidate at Shanghai University of Engineering and Technology. His main research interests include human body area communication and bioelectromagnetics.



**廖薇**(通信作者), 2010 年于华东师范大学取得博士学位, 现为上海工程技术大学电子电气工程学院副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为人体区域通信、生物电磁学、医疗领域电磁兼容性。  
E-mail: liaowei54@126.com

**Liao Wei** (Corresponding author), received her Ph. D. degree from East China Normal University in 2010. She is currently an associate professor and master tutor at the School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science. Her main research interests include human body area communication, bioelectromagnetics, and electromagnetic compatibility in the medical field.