

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2022.03.016

医学信号处理与医学仪器

基于人体通信的穿戴式医疗设备通信性能分析

车克龙, 廖薇, 周灵丽, 李启行, 吴秋雯
上海工程技术大学电子电气工程学院, 上海 201620

【摘要】人体通信(HBC)技术是利用人体组织为媒介进行通信的新方式,医疗设备使用HBC方式比传统无线通讯在能耗与辐射上更具优势。为研究HBC方式下信道特性与通信性能,文章研究信号在多种身高人体模型下的路径衰减特性;对比了两种调制方式下的信道误码率;在冲激响应模型中,通过功率延迟分布分析多径规律,并使用均方根时延扩展验证该模型。通过分析路径损耗衰减特性得出多个模型下的阴影效应均值,人体信道的阴影效应导致了系统性能下降;对比FSK和PSK调制对信道误码率的影响,PSK调制更适合体表信道;通过分析多径特性,多个模型下的平均信道多径数量约16条,且前4径占据大部分能量;电磁分析下的链路特性和建模结果十分接近,验证了模型的正确性。该研究为体域网体表链路中医疗设备接收机的设计提供了理论支持。

【关键词】人体通信技术;信号检测;路径损耗;传输特性;信道建模

【中图分类号】R318;TN911

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2022)03-0357-07

Communication performance of wearable medical equipment based on human body communication

CHE Kelong, LIAO Wei, ZHOU Lingli, LI Qihang, WU Qiuwen

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

Abstract: Human body communication (HBC) is a new way of communication using human tissues as a medium. Medical equipment using HBC is advantageous over traditional wireless communication in energy consumption and radiation. The study aims to study the channel characteristics and communication performance of the HBC mode by analyzing the signal path loss characteristics in human body models of various heights, comparing the bit error rate of channels in two kinds of modulation modes, and analyzing the multipath law in impulse response model through power delay profile. The established channel model is verified by root mean square delay extension. The average value of the shadow effect in multiple models is obtained through analyzing the path loss characteristics. The shadow effect of the human body channel leads to the reduction of system performance. The comparison on the effects of FSK and PSK modulations on the bit error rate reveals that PSK modulation is more suitable for the body surface channels. The analysis on the multipath characteristics showed that the average number of channel multipaths in multiple models is about 16, and the first 4 paths occupy most of the energy. The link characteristics under electromagnetic analysis are very close to the modeling results, verifying the correctness of the model. This study provides theoretical support for the design of medical equipment receivers in the body surface link of the body area network.

Keywords: human body communication; signal detection; path loss; transmission characteristic; channel modeling

前言

近年来,随着物联网技术的进步,为了解决人体医疗检测与智能可穿戴设备问题,人体传感网络应

运而生^[1-3]。个人体域网是一种基于人体的数据传播网络,终端设备可以是可穿戴设备或植入人体的可通信芯片^[4-6]。医疗可穿戴设备通过体域网技术进行数据交互,具有更高的抗干扰性与保密性^[7-9]。在人体区域网络中,可以在不影响人体正常活动的前提下利用人体生物组织进行通信,实现无线长期监测人体的健康信息^[10-11]。使用人体作为传播媒介,进行电子设备之间的通信来建立人体无线局域网技术(体域网)是近来发展的热点。

Liao等^[12]研究了脑电信号在人体区域环境传播特性,使用人体解剖模型进行仿真检测,并用生物等效的

【收稿日期】2021-09-15

【基金项目】国家自然科学基金(62001282)

【作者简介】车克龙,硕士研究生,研究方向:人体区域通信, E-mail: chekelong@qq.com

【通信作者】廖薇,副教授,上海高校青年东方学者,硕士生导师,研究方向: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

凝胶体模型进行了验证,证明了脑电信号沿人体手臂传输的可行性。随后,该团队研究可穿戴医疗检测设备的体域网应用,对设备控制的生物传感器的电磁干扰进行了评估,提出了一种利用生物传感器测量人体与接地层之间由外部正弦或脉冲电磁场产生的共模电压的方法,该方法为评估可穿戴医疗检测设备设计阶段的干扰性提供了检测手段^[13]。英国苏格兰的罗伯特·戈登大学计算机学院 Shadi 等^[14]基于体域网应用的安全问题,提出了现存的一些安全隐私问题的对策。

文献[15-17]提出了基于人体局域网通信的可吞咽微型天线:小型化双共振螺旋和螺旋天线系统,评估与肌肉等效的液体模型的天线性能,证明了天线在以人为中心的通信环境中具有良好的稳定性,并用于生物医学的植入物应用。在体域网的通信技术中,人体通信(Human Body Communication, HBC)技术相对于传统的短距离无线技术(Bluetooth、Wireless LAN、ZigBee等)在体域网通信方式的竞争中更具优势。华南理工大学的范伶^[18]研究了静态和半动态体域网在无线体域网共存问题,并提出两种改进干扰缓解策略。成都梁竹君团队^[19]基于老年医疗出发,使用体域网通信技术设计一种生理检测系统,将无线体域网技术应用在可穿戴设备中。

体域网在低频段的应用研究相对较少,为了在此频段进行传感技术通信性能的评估,首先对各种应用环境进行数学建模得出信道特征。由于低频段中有关医学可穿戴设备的 HBC 频段(10~50 MHz)更适合人体体表链路,因此本文基于 HBC 频段研究体域网的信道特性^[20]。通过对多组人体模型的体表到体表类型的链路进行电磁分析,建立了体表路径损耗和胸耳链路多径信道数学模型,以此评估体域网各种人体模型在 HBC 频段的通信性能特征。最后,本文以均方根(RMS)时延扩展参数对建立的信道模型进行验证,模型参数与电磁分析的结果十分接近,证明了文章所提出模型对于表征体域网信道的准确度。

1 研究方法

1.1 人体模型的建立

本文人体模型的建立方式参考王琼研究室所使用的日本情报通信研究机构(National Institute of Information and Communications Technology, NICT)数字人体组织模型建立方式。考虑到体型差异对信道电磁分析存在影响,本文对多种身高的亚洲男性人体进行电磁计算以获取一般规律。在通信研究中,基于解剖学角度利用 MRI 或 CT 数据建立人体模型是较好的方式^[21-22]。本文使用的人体模型以

2 mm×2 mm×2 mm 的立方体单元为基本单位,依据 MRI 数据构成。该人体模型在电磁仿真计算时需要明确各个器官区域频段的介电特性,在 HBC 频段人体介电特性与频率关系由 Debye 公式给出:

$$\hat{\epsilon}_r(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\Delta\epsilon}{1 + j\omega\tau} \quad (1)$$

其中, $\Delta\epsilon$ 表示色散程度, ϵ_∞ 是无穷频率的介电常数。

人体各组织介电特性以 HBC 频段中心频率为参照,设置人体模型的电磁特性参数。本文使用赫兹偶极子天线作为信号收发机,研究链路属于视距传播链路,在人体正面包含了胸耳链路的位置放置了 60 个接收点,接收电极空间位置水平方向相距 80 mm,竖直方向相距 100 mm,放置于距离人体表面大约 2 mm 处。发射机放置于距离人体左胸表面 2 mm 处。人体模型如图 1 所示。

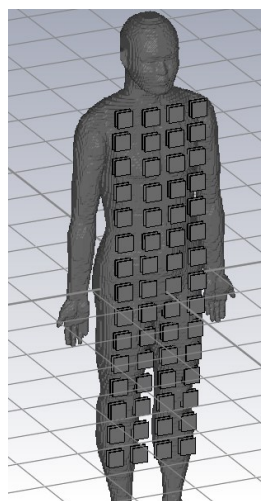


图1 3D均值人体仿真模型

Figure 1 3D mean human body simulation model

1.2 电磁分析方法

电磁波在人体区域传播特性通常使用时域有限差分电磁分析(FDTD)方法表示,其由时域 Maxwell 方程推导而出:

$$\Delta \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2)$$

$$\Delta \times H = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \sigma E \quad (3)$$

其中, ϵ 是介电常数, μ 是磁导率, σ 是电导率, H 是磁场强度, E 是电场强度。

在数值计算中参照人体组织解剖数据创建 Yee 氏元胞进而计算内部电场。但在开域问题中计算区域为截断有限尺寸时必须要考虑边界条件,为了模拟真实物理空间的无反射特性,本文研究的电磁场边界条件为完全匹配层吸收边界条件。场的能量激励源天线为发射点的赫兹偶极子天线,天线的输入

阻抗 $Z_{in}(\omega)$ 由下式推导计算:

$$Z_{in}(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} = \frac{F\{u(t)\}}{F\{i(t)\}}$$

(4)

其中, $F\{\cdot\}$ 代表傅里叶变换, $u(t)$ 表示激励电压, $i(t)$ 表示激励电流。

本文以高斯脉冲作为激励源, 调节形状因子使信号所产生的能量集中在 HBC 频段, 利用 FDTD 方法计算电磁特性。激励信号可以表示为:

$$v(t) = \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$$

(5)

其中, 系数 A 是振幅, σ 是标准差。高斯脉冲作为激励源, 其中心频率为 30 MHz, 适于计算 HBC 频段的信道特性。

2 信道衰减特性分析

2.1 路径损耗计算

本文建立了损耗模型和多径模型研究信道损耗和时域特性。对于信道的损耗特性, 研究重点在于无线传感网络中的体表环境收发机特性, 依据视距 (Line-of-Sight) 传播信道对人体模型的 60 个位置进行电磁数值计算获取人体路径损耗^[23-24]。路径损耗由以下方法表述:

$$PL_{dB}(d) = 10 \lg \left[\frac{E_t(d)}{E_r(d)} \right] + G_{t,dB} + G_{r,dB}$$

(6)

其中, $E_t(d)$ 和 $E_r(d)$ 分别表示发射机和接收机的能量, 可以通过发射电压和接收电压的波形得到。表 1 为相同体质量下 5 种身高 (169、173、177、181、185 cm) 的身体模型路径损耗参数。可以得到在身高发生变化而体质量保持不变的情况下, 链路损耗的整体趋势表现为相同的人体链路会随着身高增加路径损耗增大。

表 1 不同人体表面距离下的路径损耗(dB)

Table 1 Path loss at different distances from the surface of the human body (dB)

身高/cm	200 mm	400 mm	600 mm	800 mm	1 000 mm
169	72.76	91.35	92.43	93.10	92.68
173	71.73	90.22	96.29	98.05	92.13
177	67.49	89.46	92.46	94.25	99.25
181	65.52	86.64	90.35	93.24	98.79
185	70.10	92.12	94.29	98.38	99.73

通过电磁分析方法得出了不同人体模型下的路径损耗, 根据结果可以发现随着人体身高增加, 信号衰减效果整体有增加趋势。为了统计各种人体模型

对信道的影响, 本文还研究了 5 种身高人体模型的通信信道特性。通过分析通信距离和路径损耗的关系, 得出了路径损耗模型, 拟合所测得的路径损耗, 分析了不同身高人体模型进行通信的阴影效应。

2.2 阴影效应分析

由试验测得的路径损耗数据可以得到 5 种身高人体模型的体表信道路径损耗模型, 图 2 给出了人体表面不同通信长度下的路径损耗散点图。将测得路径损耗数据进行拟合, 发现使用二阶指数模型可以很好地反映人体路径损耗的变化情况。根据路径损耗的一般模型式 (6), 利用二阶指数得出模型 (7):

$$PL_{dB} = PL_{fit} + S_{dB}$$

(7)

$$PL_{fit} = Ae^{\alpha x} + Be^{\beta x}$$

(8)

式 (7) 是 5 种人体模型下得到的二阶指数拟合, 对多种身高统计得到的平均结果为 $A=1.02 \times 10^2$ 、 $\alpha=-6.8 \times 10^{-5}$ 、 $B=-8.05 \times 10^1$ 、 $\beta=-8 \times 10^{-3}$, 其中 S_{dB} 是通过数值计算得到的路径损耗均值。 S_{dB} 服从正态分布, 其标准差为 $\sigma_{dB}=2.787$ 。数值计算得到的路径损耗和拟合得到的路径损耗均值存在一定的偏差, 这是由于人体体表电磁波在传播过程中会被皮肤吸收或在人体的阴影区域发生衍射。

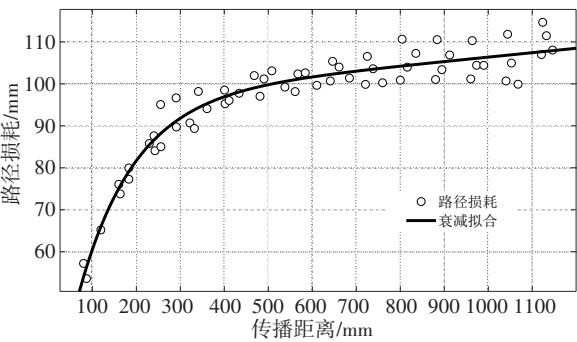


图 2 人体表面不同路径长度下的路径损耗($\sigma_{dB}=2.787$)

Figure 2 Path loss at different path lengths on human surface ($\sigma_{dB}=2.787$)

人体的阴影衰落特性会降低通信质量, 本文通过研究系统平均误码率 (Average BER, ABER) 性能评估阴影衰落对信道的影响:

$$P_b(\bar{\gamma}) = \int P_o(\gamma) p(\gamma) d\gamma$$

(9)

其中, $\bar{\gamma}$ 表示信噪比 (SNR) 的平均值, $P_b(\cdot)$ 表示在人体阴影衰落效应下的系统 ABER, $P_o(\cdot)$ 表示加性高斯白噪声 (AWGN) 下的系统误码率, $p(\cdot)$ 表示 SNR 概率密度函数。

对比式 (7), 研究发现在各个人体模型下接收机的接收信号都存在波动, 这种情况会导致系统的 ABER 性能发生变化。分析现象主要由于电磁波在

人体的阴影区域发生衍射产生信号畸变导致。这种影响会体现在接收机的SNR之中。因此获取系统的ABER特性需要对SNR概率密度进行推导,具体步骤如下:(1)得到 S_{db} 的统计分布。其标准差 σ_{db} 为2.787;(2)由式(7)和 S_{db} 推导出 PL_{db} 服从正态分布;(3)以 PL 的统计特性推出每比特能量与噪声功率谱密度比值(E_b/N_0)的分布特性和SNR的概率密度。

使用以上方式对体域网视距体表链路SNR的概率密度进行推导得到:

$$p(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma \gamma} e^{-\frac{(\ln \gamma - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (10)$$

结合式(9)和式(10)可以得到基本调制方式下体域网体表信道中通信质量ABER:

$$P_b(\bar{\gamma}_m) = \sum_{n=1}^N P_0(\gamma_n) P_m(\gamma_n) (\gamma_n - \gamma_{n-1}) \quad (11)$$

其中, γ 为信噪比, $m=1, 2, 3, \dots$, $P_m(\cdot)$ 表示 γ_m 的概率密度函数,方程离散化便于计算。

利用以上公式得出人体模型下的体表链路通信ABER特性曲线。图3中给出了在人体的阴影衰落和AWGN两种环境下,系统采用频移键控(FSK)和相移键控(PSK)两种方式的ABER曲线。由图3可知,当ABER为 10^{-5} 时,系统整体由于阴影效应的影响,通信性能下降达4.15 dB,阴影衰落会让信道的系统ABER显著降低。通过对比人体环境下两种不同调制方式的ABER,发现在PSK调制方式下系统具有更优秀的通信性能,与FSK调制方式相差3.07 dB。

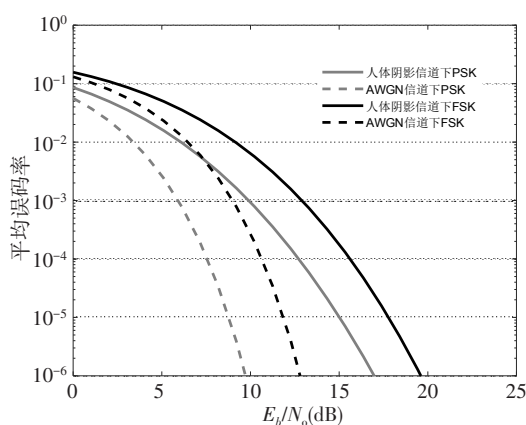


图3 人体环境下对两张调制方式的影响
Figure 3 Effects of human environment on two kinds of modulation methods

3 信道多径特性分析

3.1 多径分布特性

在体域网应用设备的研究中,胸部-左耳链路出现频率较高,本文通过分析该条链路的信道特性,研

究HBC频段下人体通信的体表特征。由于电磁波在人体表面传播时存在各种衍射、折射现象,发射信号的传播路径因人体环境而变化,在发射机到接收机的传输链路上,电磁波信号出现复杂的多条传播路径。因此本文通过数字建模分析了体表链路信道的时变特性^[25-26]。

本文对5组人体模型进行了电磁分析,基于人体模型下胸部-左耳链路所测得的数据,得到了5组通信链路的平均功率延迟分布(Power Delay Profile, PDP)。在求解PDP过程中,由于时域冲激响应的旁瓣过大,需要使用加窗技术,本文将高斯窗应用在PDP的求解过程中。加窗处理明显降低了频域的旁瓣影响,获取了高质量的PDP。分析仿真结果发现接收机检测的信号是簇的形式,由于多径效应信号在传播的过程中产生了各种分量,各个信号分量到达接收机的时间不同,经过不同的时延后被接收机接收。本文通过识别PDP中的尖峰,统计尖峰的抵达时间与功率,进而分析信号功率增益。为了降低数据处理的复杂度,忽略过小的尖峰,本次试验将信号衰减25 dB设定为阈值。

收发机空间位置和人体模型的不同对信号各分量的产生均存在影响,因此本文对多组人体身高模型的相同链路均进行了电磁分析。在电磁分析中,观察到信号的功率存在分布随机的20多个尖峰,且尖峰周围具有大量抖动。在后续研究中,对所测数据的每一簇尖峰视为一个多径分量抵达接收机。图4是身高为177 cm的模型的体表链路PDP,各组身高模型下的链路具有相同的衰减状分布。文章统计尖峰的间距和时间规律,获得系统各个模型下多径的抵达时间和功率增益均值分布规律。

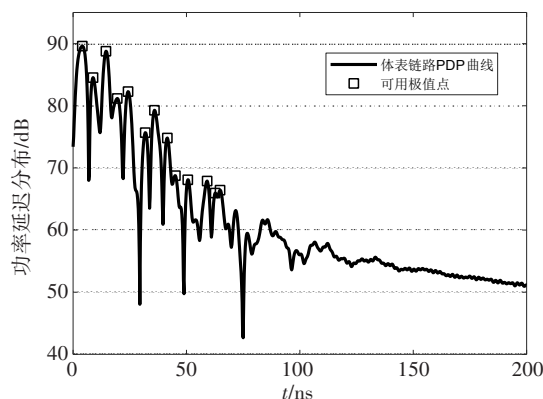


图4 体表链路的功率延迟分布
Figure 4 Power delay profile of body surface link

一般情况下,系统的信道特性依赖于冲激响应,实际信道的多径特性即是模型样本的统计特性,因

此本文建立了冲激响应模型来描述系统的多径分布,如式(12)所示:

$$h(t) = \sum_k \beta_k e^{j\theta_k} \delta(t - \tau_k)$$

(12)

由于多径分布特性可以用冲激响应来表示,文章将 Saleh-Valenzuela 模型进行了适当的修改,用于5组人体身高模型下的冲激响应模型。文章以PDP的规律建立冲激响应模型。胸耳链路中信号多径的路径间延迟使用逆高斯分布对数值计算结果拟合。由于不同情况下的第一径到达时间存在较大的离散性,采用正态分布作为拟合函数。

文章在HBC频段的胸耳链路上建立信道模型,描述了多径分量的功率关系。结果显示了信号在体表链路传播时,不同情况下的第一径到达时间存在较大的波动,对数据进行样本处理得到的第一径到达时间均值和标准差分别为7.83和4.91 ns。路径间延迟时间参数对建立冲激响应模型十分重要,本文对路径间延迟的数据使用逆高斯分布拟合,拟合效果良好。测定结果均值和标准差分别为4.59和2.21 ns。基于这些测定结果建立的冲激响应模型如图5所示。

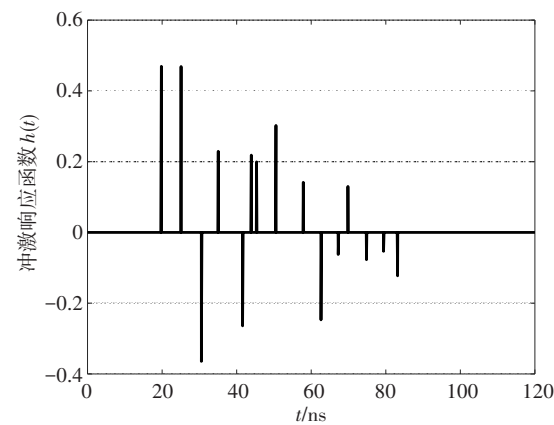


图5 系统冲激响应模型建立
Figure 5 Establishment of impulse response model

本文以逆高斯分布描述多径的径间间距、根据第一径到达时间的统计特性确定第一径出现位置的概率,建立可以表征实际产生的多径分布信道冲激响应模型。如图6、图7所示,利用各个身高模型的体表链路统计了通信链路中多径出现的概率和多径能量的分布。其中,多径数量的均值为16.72,标准差为3.12。由图7可知,信道中前2径平均可以获得36.44%的能量,前4径平均可以获得53.48%的能量。平均9条多径就能达到总能量的80%。

3.2 时延扩展研究

为了验证统计模型的准确性,本文比较了RMS

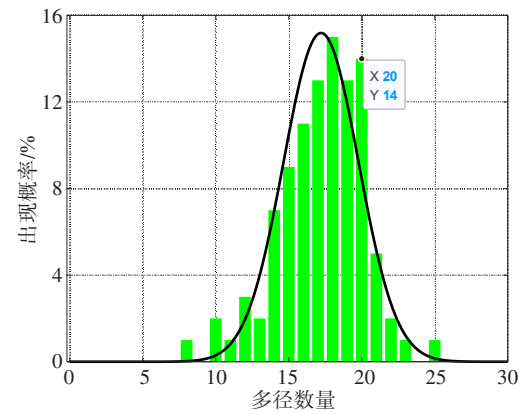


图6 信道多径数量分布统计
Figure 6 Distribution statistics of channel multipath number

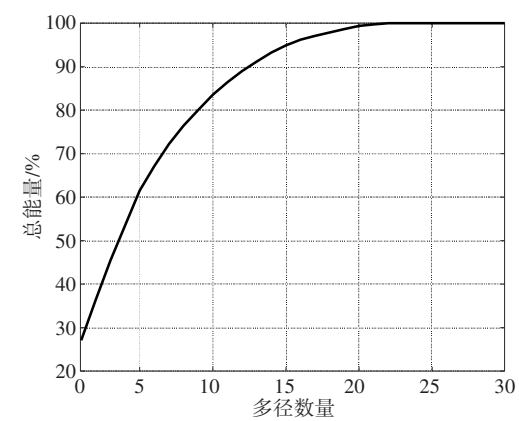


图7 信道多径能量的分布统计
Figure 7 Distribution statistics of channel multipath energy

时延扩展和附加时延等参数。RMS时延扩展参数是信道冲激响应有效持续时间的良好度量。

$$\tau_m = \frac{1}{P_R} \int_0^\infty \tau p(\tau) d\tau$$

(13)

$$\sigma_\tau = \sqrt{\frac{1}{P_R} \int_0^\infty (\tau - \tau_m)^2 p(\tau) d\tau}$$

(14)

其中, P_R 为多径平均功率, σ_τ 为RMS时延扩展, τ_m 是平均附加时延。文章为研究阴影衰落对多径特性的影响,在多种人体模型的体表链路下使用冲激响应模型表征信号的多径特性。分析链路的PDP确定各个参数的分布规律,进而选择模型参数。使用模型预测系统的多径分布和能量分布。为了验证所建立模型对系统表征的正确性需要计算所建立模型的RMS参数。图8对比了FDTD数值计算和建模两种条件下得到的体表传输链路的RMS时延扩展结果,可以看出建模与FDTD数值仿真计算得到的结果接近,满足期望。这表示基于HBC频段体表-体表链路信道特性建模和多径特性分析结论真实可靠。

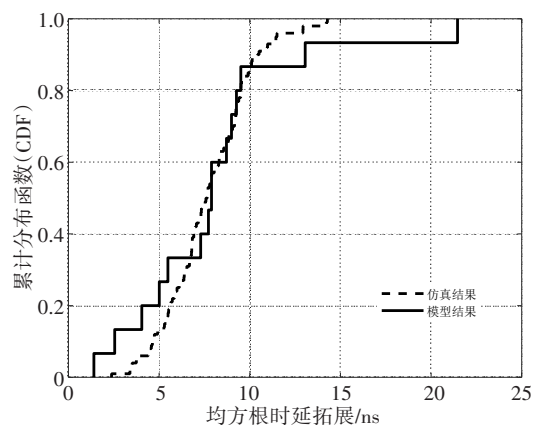


图8 系统FDTD数值仿真计算和建模两种方式得到的时延扩展对比

Figure 8 Comparison of delay extensions obtained by system FDTD calculation versus modeling

4 结语

本文使用FDTD电磁分析方法研究了体表信道下,HBC通信方式的理论性能。从多种人体模型的路径损耗出发,建立了一种基于HBC频段下的体表链路路径损耗模型,并测出了人体环境的阴影效应标准差。综合不同人体阴影效应后,发现通信信道的误码率下降达4.15 dB。对比不同调制方式对信道误码率的影响,PSK调制方式更适合体表信道,其ABER性能较FSK调制方式高出3.07 dB。文章通过对链路的多径特性分析,建立了一种信道冲激响应模型表征信道多径特性。并使用RMS时延扩展对FDTD数值计算和所建模型结果进行对比,发现建模与数值仿真计算的时延扩展十分接近。验证了模型的准确性。在文章研究条件下,系统多径数量的均值为16.72,平均9条多径就能得到总能量的80%。研究结果对于体域网通信医疗监测与诊断设备接收机天线的设计具有指导价值。

下一步将在多径特性和阴影特性模型层面针对医疗设备接收机通信质量的改善进行研究,同时将研究对象扩展至体内医疗检测天线的辅助开发,通信方式从体表向体内和多人通信方向发展。

【参考文献】

- [1] 梁舒.超宽带可穿戴天线[D].成都:电子科技大学,2021.
LIANG S. Ultra-wideband wearable antenna [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [2] 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.
- [3] 余晓杰.人体通信信道特性研究[D].南京:南京邮电大学,2017.
YU X J. Research on the characteristics of human body communication channel [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017.
- [4] 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. Mathematical model of HBC channel in motion [J]. Software Guide, 2020, 19(11): 75-78.
- [5] KAHNG S, LEE C, PARK H, et al. A WBAN reader antenna to improve the wireless link with an in-body WBAN antenna [C]//2018 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP). IEEE, 2018. DOI:10.1109/INCAP.2018.8770734.
- [6] MPANDA R S, LIANG Q, XU L, et al. Investigation on various antenna design techniques for vital signs monitoring [C]//2018 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC). Xuzhou, 2018.
- [7] HAN F, LIU H, LI B, et al. HBC-UWB channel modeling for in-body to on-body communication link [C]//2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT). IEEE, 2019: 1458-1462.
- [8] ZHAO J, SUN W, MAO J, et al. An auto loss compensation system for capacitive-coupled body channel communication [J]. IEEE Trans Biomed Circuits Syst, 2019, 13(4): 756-765.
- [9] WANG J Q, WANG Q. Body area communications: channel modeling, communication systems, and EMC [M]. Wiley-IEEE Press, 2012.
- [10] WANG X, SHI J, XU L, et al. A wideband miniaturized implantable antenna for biomedical application at HBC band [C]//2018 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC). Xuzhou, 2018.
- [11] WANG J, FUJIWARA T, KATO T, et al. Wearable ECG based on impulse-radio-type human body communication [J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2016, 63(9): 1887-1894.
- [12] LIAO W, MURAMATSU K, WANG J Q. Path loss analysis and transceiver development for human body communication-based signal transmission for wearable robot control [J]. IEEE Access, 2021, 9: 20127-20135.
- [13] LIAO W, NAGAI K, WANG J. An evaluation method of electromagnetic interference on bio-sensor used for wearable robot control [J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 2020, 62(1): 36-42.
- [14] SHADI H M, OMAR A K M, KUMARA K H. A survey on wireless body area networks: architecture, security challenges and research opportunities [J]. Comput Secur, 2021, 104: 102211.
- [15] SHI J J, LIU H L, WANG X, et al. Miniaturized dual-resonant helix/spiral antenna system at MHz-Band for FSK impulse radio intrabody communications [J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2020, 68(9): 6566-6579.
- [16] ZHANG J, WU S, WANG Y, et al. A dual-band planar spiral antenna at VHF band for body area communications [C]//2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT). IEEE, 2019: 790-794.
- [17] LIU H, SHI J, WU S, et al. Dual-band monopole-helix antenna system for MHz-Band implant body area networks [C]//2019 International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM). 2019: 1-2.
- [18] 范伶.共存无线体域网干扰问题研究[D].广州:华南理工大学,2020.
FAN L. Research on interference between coexisting wireless body area networks [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [19] 梁竹君.无线体域网老人健康监护系统设计[J].信息通信,2019(12): 286-288.
LIANG Z J. Design of wireless body area network elderly health monitoring system [J]. Information & Communications, 2019(12): 286-288.
- [20] 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 on the development of intra-body communication technology [J]. Information Recording Materials, 2020, 21(3): 18-19.
- [21] 李少华,聂泽东,李景振,等.人体通信不同信道传播特性的研究[J].计算机工程与应用,2017,53(18): 67-72.
LI S H, NIE Z D, LI J Z, et al. Study on propagation characteristic of different channels of human body communication [J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(18): 67-72.
- [22] MAO J, YANG H, LIAN Y, et al. A five-tissue-layer human body communication circuit model tunable to individual characteristics [J]. IEEE Trans Biomed Circuits Syst, 2018, 12(2): 303-312.

[23] LE T T, YUN T Y. Wearable dual-band high-gain low-SAR antenna for off-body communication[J]. IEEE Antennas Wirel Propag Lett, 2021, 20(7): 1175-1179.

[24] JING F, LING Z, TING W, et al. The influence on medical activities by mobile medical application[C]//2018 4th Annual International Conference on Network and Information Systems for Computers (ICNISC). 2018: 104-106.

[25] 徐锦鹏. 基于健康医疗的体表及体内天线研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.

XU J P. Research on body surface and in vivo antenna based on health care [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.

[26] 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. DOI:10.1109/BIOCAS.2019.8919024.

(编辑:薛泽玲)