

基于准静电场的体域通信信道随机特性及系统性能仿真

解禹, 黄忠华, 李银林, 崔占忠

北京理工大学机电学院, 北京 100081

摘要 基于准静电场的体域通信技术是一种用于人随身电子设备互连的新方法。为研究人体运动对体域通信系统性能的影响, 实验测量了人体静止、踏步和跑步 3 种状态下的信道增益, 得到信道增益的累积分布函数, 与多种常见统计分布类型相对比, 发现其服从正态分布, 并利用最大似然方法进行了分布参数估计, 得到信道增益的均值、标准差和置信区间。基于信道分布特性, 建立了信道统计模型以及系统仿真模型, 并进行系统性能仿真, 在高斯白噪声环境下通过仿真研究了人体运动对幅移键控系统误码率的影响, 给出了体域通信信道建模和仿真的一般方法。结果表明, 通信误码率随人体运动激烈程度增强而升高, 但变化程度不大。

关键词 准静电场; 体域通信; 性能仿真

中图分类号 O441, TM15

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)13-0024-05

Statistical Characteristics of Body Area Communication Channel Based on Quasi-electrostatic Field and System Performance Simulation

XIE Yu, HUANG Zhonghua, LI Yinlin, CUI Zhanzhong

School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract Body area communication based on quasi-electrostatic field is a new technology to implement the inter-connection between personal pocket electronic devices. The effect of body movement on performance of body area communication system was studied. Channel gains on body standing, making time, and running were measured in experiments. Based on the experiments' data, the cumulative distribution function of channel gain was acquired and compared with several general statistics distribution. Channel gain obeyed normal distribution. Parameters were estimated using maximum likelihood method. The mean, standard deviation and confidence interval were acquired. Then, channel statistical and simulation model has been established to analyze the system performance. Within the environment of Gaussian white noise, the effect of body movement on system performance of amplitude shift keying modulation was simulated. The general methods of body area communication channel modeling and simulation were given. Results show that Bit Error Rate (BER) increased slightly with fierce degree of body movement.

Keywords quasi-electrostatic field; body area communication; performance simulation

0 引言

体域通信是一种实现个人随身电子设备间相互通信的新方法^[1], 它是将准静电场耦合到人体并以人体为信道实现数据通信。将导体放置于电场中, 导体表面会感应出静电荷; 当外施电场变化时, 电荷量也随之改变。检测电场物理量变

化进而获取信息, 在静电探测技术^[2]中得到广泛应用。若将需要发送的信息调制到准静电场, 并耦合到人体, 人体周围产生微弱电场^[3], 接收机检测该微弱电场的变化, 解调并提取信息, 即可实现无线体域通信, 可应用于娱乐^[4]、医疗^[5-6]等领域。Zimmerman^[7]开发了第一个基于准静电场的体域通信系

收稿日期: 2010-03-18

基金项目: 国家部委预研基金项目(7130819)

作者简介: 解禹, 博士研究生, 研究方向为体域通信网络, 电子信箱: xieyu@bit.edu.cn; 崔占忠(通信作者), 教授, 研究方向为武器系统与运用工程, 电子信箱: cuizz@bit.edu.cn

统;Partridge^[8]讨论了不同接地情况及不同极板面积对信号的影响。早期体域通信系统传输速率较低,在几十 Kbps 以内^[9]。由于收发电极与人体间的距离对信号传输影响很大^[10],为提高速率,一些系统采用将电极与人体皮肤直接接触的方式进行传输^[11-12]。

正因为收发电极与人体的距离对信号传输有影响,体域通信设备与人体之间发生相对运动时,会改变信道增益。本文研究的体域通信技术用于人体随身电子设备间的互联,而这些设备可能佩戴在人体各处^[13]。更重要地,在人各种不同的运动状态下,如走路、奔跑等,身体会发生震动,导致体域通信设备与人体距离、相对位置等变化,引起信道增益的改变。本文针对这一问题,首先通过实验采集信道增益变化数据;然后分析其概率分布,并估计分布参数;最后根据信道增益分布特点,建立信道统计模型,并通过仿真,研究其对通信系统性能的影响。

1 体域通信信道增益的随机特性

人体运动形式是没有固定规律的,因人体运动带来的体域通信信道增益的改变是个随机过程。对人体运动状态进行建模十分困难,因此,本文在人体静止、踏步、跑步 3 种不同状态下测量信道增益,并根据所记录的数据对信道增益的随机特性进行分析。

1.1 信道随机特性测试实验

由于测量仪器无法随人体自由移动,故选择了静止站立、原地踏步和原地跑步 3 种状态,并分别测试了发射机佩戴在人体不同位置的情况。

人体动作的频率比较低,在赫兹量级。百米短跑属于动作频率相对较高的一项运动,国际百米赛事中,运动员跑完全程一般需要 10s,迈出约 50 步;普通人需要的时间更长,步伐也更多,故认为,因人体运动导致的信道增益变化频率不超过 10Hz。为保证采样的合理性,设定接收信号幅度采样频率为 100Hz。本文在每次测量中采样 500 次,即每次分析的样本容量均为 500;每次实验持续采样 5s,在这 5s 内,人体保持一定的运动状态。

实验中发射电路产生幅度为 9V,频率为 300kHz 的连续正弦波信号,接收端采用幅值检测电路得出信号幅度,并使用基于 Labview 的数据采集系统对其进行采样,计算信道增益并存储,如图 1 所示。得到实验数据后,对其概率分布进行分析。

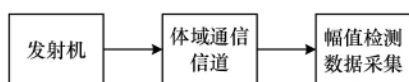


图 1 体域通信信道统计特性测试

Fig. 1 Experiment for statistical characteristics of body area communication channel

1.2 体域通信信道增益的概率分布

图 2(a)给出了 9 种不同情况下的实验数据累积分布函

数曲线,包括发射机位于左手腕、左膝部和左脚踝(接收机统一位于右手手腕),3 种不同运动状态的信道增益测量值。由于信道增益为负值,若直接分析其概率分布类型,可选择的只有正态分布、Logistic 分布、极值分布等。若将实验数据统一加上一个常数,使其全部变成正实数,则可以考虑更多的分布类型。

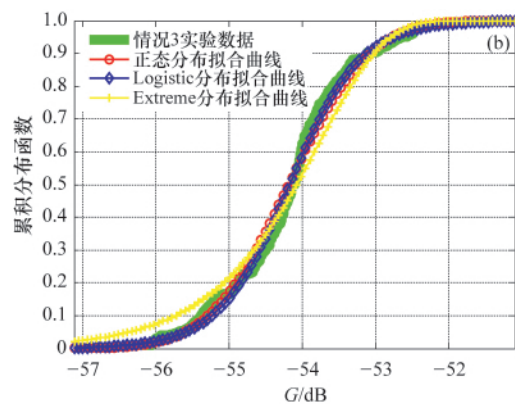
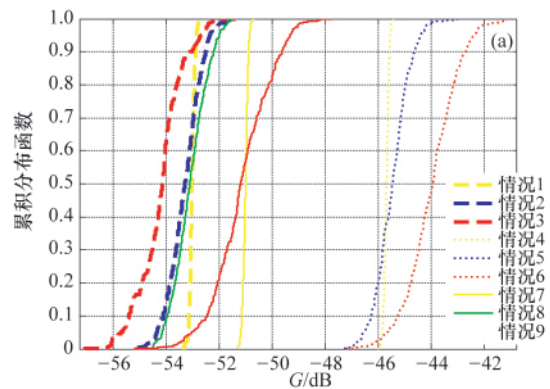


图 2 实验数据的累积分布函数与拟合分布曲线对比
Fig. 2 CDF of experimental data and fitted curve

为选择适用于描述体域通信信道的分布类型,先比较分布拟合曲线与实验数据累积分布曲线的一致程度。图 2(b)给出了发射机位于左手腕、人原地跑步时的实验数据累积分布函数与 3 种拟合分布曲线的对比。从图中可以看出,正态分布和 Logistic 分布拟合曲线与实验数据较为符合,而极值分布与实验数据相差较大。将上述实验数据统一加上一个常数 60dB 后,累积分布函数与拟合曲线对比可知,莱斯分布、Nakagami 分布和对数正态分布也能与实验数据取得较好的一致性,如图 3 所示。

其他情况下,正态分布均能与实验数据相符,且其使用普遍。选用正态分布描述体域通信信道增益的随机变化,其概率密度函数为

$$f(x; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

其中, μ 为数学期望, σ 为标准差, x 为信道增益样本值。

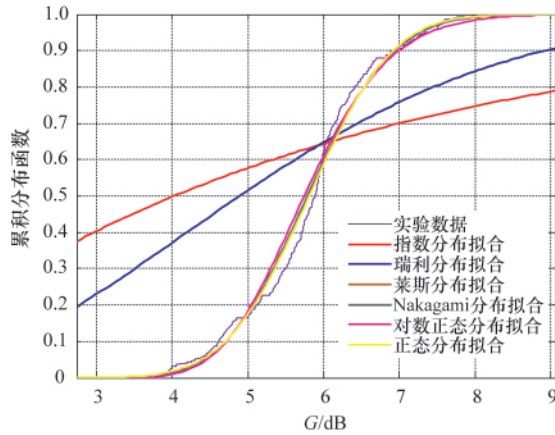


图 3 修改后实验数据的累积分布函数与拟合分布曲线对比
Fig. 3 CDF of fixed experimental data and fitted curve

1.3 体域通信信道增益的参数估计

1.2 节确立采用正态分布对体域通信信道增益的随机变化进行描述,本节采用最大似然估计法对其期望和方差进行

估计,并计算其置信区间。对于正态样本,有

$$\begin{cases} \hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x} \\ \hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \end{cases} \quad (2)$$

根据式(2),各种发射机位置和人体运动状况下信道增益均值和标准差的最大似然估计值如表 1 所示。

从表 1 可以看出,信道增益均值与人体运动状态之间不存在明显的关系;但随着发射机位置的降低,信道增益均值变大,当发射机位于左脚踝处时,信道增益均值最大,符合 Zimmerman 发射机位置降低导致信道增益变大^[14]的结论。信道增益标准差与发射机位置不存在明显的联系;但人静止站立时信道增益标准差最小,跑动时最大,说明人体运动越剧烈,信道增益标准差越大,即信道增益的变化程度越大。理论上,人体静止不动时,信道增益应当不变,但测量结果有微小变化,可能是环境因素微小变化或测量仪器的误差导致。显然,信道增益变化程度过大,会对通信质量造成不良影响。

表 1 分布参数估计及其置信区间

Table 1 Distribution parameter estimation and its confidence interval

发射机位置和人体运动状态			μ	μ 95%置信区间	σ	σ 95%置信区间
左手腕	静止站立	情况 1	-53.01	[-53.02 -52.99]	0.1019	[0.0960 0.1087]
	原地踏步	情况 2	-53.29	[-53.35 -53.23]	0.6237	[0.5872 0.6649]
	原地跑步	情况 3	-54.19	[-54.27 -54.11]	0.8628	[0.8124 0.9199]
左脚踝	静止站立	情况 4	-45.69	[-45.70 -45.68]	0.0962	[0.0906 0.1025]
	原地踏步	情况 5	-45.47	[-45.53 -45.41]	0.6479	[0.6101 0.6908]
	原地跑步	情况 6	-43.98	[-44.07 -43.90]	0.9948	[0.9367 1.0606]
左膝	静止站立	情况 7	-51.00	[-51.01 -50.99]	0.0998	[0.0940 0.1064]
	原地踏步	情况 8	-53.08	[-53.14 -53.03]	0.6478	[0.6099 0.6906]
	原地跑步	情况 9	-51.13	[-51.22 -51.02]	1.1072	[1.0426 1.1804]

2 体域通信信道统计模型及性能仿真

2.1 体域通信信道统计模型建立

对于发射机输出端,已调信号可表示为

$$x(t) = A(t) \cos[2\pi f_0 t + \phi(t)] \quad (3)$$

其中, $A(t)$ 为信号实包络, $\phi(t)$ 为信号相对于 $2\pi f_0 t$ 的相位偏移, f_0 为载波频率。

根据欧拉公式,式(3)可表示成

$$x(t) = \text{Re} \{ A(t) e^{j\phi(t)} e^{j2\pi f_0 t} \} \quad (4)$$

其中, $\tilde{x}(t)$ 为信号 $x(t)$ 的复包络。令 $\tilde{x}(t) = A(t) e^{j\phi(t)}$, 则有

$$x(t) = \text{Re} \{ \tilde{x}(t) e^{j2\pi f_0 t} \} \quad (5)$$

式(5)为其指数形式表达式。

体域通信中,由于人体的运动、环境的变化等因素,可认为体域通信信道传递函数是随时间变化的。因此,接收机输

入端信号可表示为

$$\tilde{r}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f, t) \tilde{X}(f) e^{j2\pi f t} df \quad (6)$$

其中, $\tilde{r}(t)$ 表示接收机输入端信号的复包络, $H(f, t)$ 表示信道时变传递函数,且

$$\tilde{X}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (7)$$

在信号频带内,体域通信信道为非频率选择性信道,因此信道的时变传输函数 $H(f, t)$ 在信号带宽内可看成为与频率无关的量 $H(t)$, 因此式(6)可进一步简化为

$$\tilde{r}(t) = H(t) \tilde{x}(t) = a(t) e^{j\varphi(t)} \tilde{x}(t) \quad (8)$$

其中, $H(t) = a(t) e^{j\varphi(t)}$ 为信道乘性衰落,且包络 $a(t)$ 和相位 $\varphi(t)$ 均为随机过程。

根据前文分析可知,体域通信中信道增益变化主要由人

体运动或环境变化决定, 这些因素与信号码元传输速率相比, 变化十分缓慢, 因此可以认为体域通信信道特征在一个码元周期内保持不变, 即当作时不变系统来研究, 则式(8)可简化为

$$\tilde{r}(t) = ae^{j\varphi} \tilde{x}(t) \quad (9)$$

其中, a 和 φ 均为随机变量, 它们分别体现体域通信信道对所传输信号的幅度和相位带来的影响。由此可建立基于准静电场的体域通信信道统计模型, 如图 4 所示。

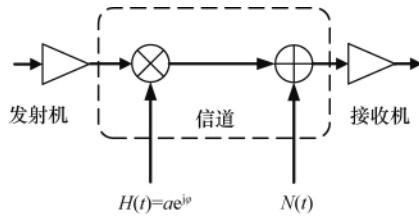


图 4 体域通信信道统计模型
Fig. 4 Statistical model of body area communication channel

图 4 中, $H(t) = ae^{j\varphi}$ 为信道乘性衰落, $N(t)$ 为加性噪声。由于信道增益服从正态分布, 可从统计模型中计算出 a , 而体域通信中测量相位变化比较困难, 对于 φ 的分布问题还有待进一步研究。

2.2 基于信道统计模型的系统性能仿真

由上述分析可知, 体域通信信道可用乘性干扰 $H(t) = ae^{j\varphi}$ 和加性高斯白噪声模拟。因此, 可以建立如图 5 所示的体域通信信道仿真模型。数据源产生一个二进制随机序列, 该信号经 BASK 调制器调制后, 经信道进行传送。

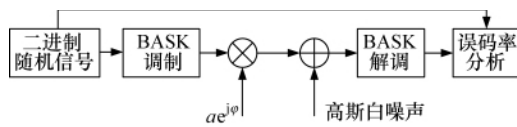


图 5 体域通信信道仿真模型
Fig. 5 Simulation model of body area communication channel

根据上述仿真模型, 利用 Matlab 建立仿真系统。根据表 1 生成不同人体运动状态下的信道增益, 并计算幅度衰落 α 。仿真中 φ 取常数, 采用误码率-信噪比 (BER- E_b/N_0) 曲线表示系统性能。由于发射机位置主要决定信道增益均值, 而人体运动影响其方差, 本文的系统性能仿真主要针对人体不同运动状态的影响。

图 6 显示了仅有信号幅度衰落时, 不同的人体运动状态下 BASK 信号传输的链路误码率性能。其信道幅度衰落取值根据表 1 中情况 1 至情况 3 的数据进行计算。由图 6 可以看出, 人体运动状态下越激烈, 系统误码率越高, 但总体来说,

静止站立、原地踏步和原地跑步 3 种运动状态下的误码性能相差并不大。发射机位于其他位置的仿真也能得到相似的结论。这说明, 虽然人体运动使信道增益出现一定的随机散布特性, 但由于其散布范围较小, 并不对通信系统误码性能构成严重影响。

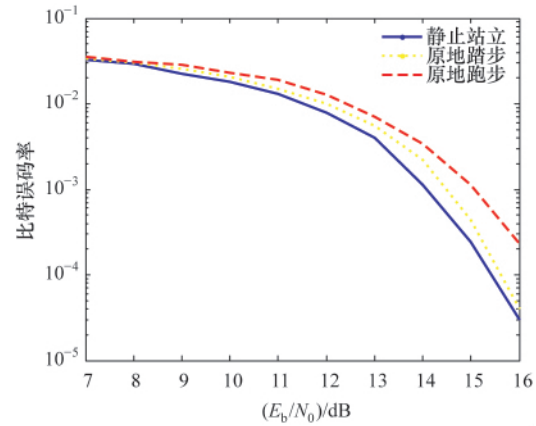


图 6 不同运动状态下体域通信系统仿真性能
Fig. 6 System simulation performance of body area communication in different body movement state

3 结论

本文测量并记录了人体在原地静止、踏步和跑步 3 种运动状态下的体域通信信道增益, 分析了实验数据的累积分布函数, 与若干常见概率分布相对比, 正态分布在描述信道增益随机变化时能取得较好的一致性。使用最大似然方法估计了信道增益分布参数, 并给出了置信区间。从其分布参数可知, 人体运动越激烈, 信道增益的方差越大。基于信道增益概率分布, 建立了体域通信信道统计模型和仿真模型, 在高斯白噪声环境下通过仿真研究了人体运动对幅移键控系统误码率的影响。结果显示, 随人体运动激烈程度增加, 误码率有所上升, 但总体变化不大, 说明人体运动对系统误码性能影响较小。

参考文献 (References)

- [1] Ashok R L, Agrawal D P. Next-Generation Wearable Networks [J]. *IEEE Computer Society*, 2003, 36(11): 31-39.
- [2] 白玉贤. 静电引信探测模型的建立与分析 [J]. *探测与控制学报*, 2002, 24(2): 45-48.
Bai Yuxian. *Journal of Detection and Control*, 2002, 24(2): 45-48.
- [3] Fujii K, Ishide D, Takahashi M, et al. Electric field distributions generated by a wearable device using simplified whole human body models [J]. *Journal of the Institute of Image Information and Television Engineers*, 2008, 62(12): 1980-1987.
- [4] Song S, Lee S J, Cho N, et al. Low power wearable audio player using human body communications [C]. 10th IEEE International Symposium on Wearable Computers, Montreux, 2006.

- [5] Li Y L, Huang Z H. Modeling of Body Area Network in medical healthcare applications [C]//IEEE International Symposium on IT in Medicine Education, ITIME '09. 2009.
- [6] Alshehab A, Kobayash N, Kikuchi R, *et al.* A study on intra-body communication for personal healthcare monitoring system [C]. 10th International Conference on E-health Networking, Applications and Services, HealthCom 2008, Singapore, 2008.
- [7] Zimmerman T G. Personal area networks: Near-field intrabody communication[J]. *IBM Systems Journal*, 1996, 35(3-4): 609-617.
- [8] Partridge K, Dahlquist B, Veisoh A, *et al.* Empirical measurements of intrabody communication performance under varied physical configurations [C]//Proceedings of the 14th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'01), Orlando, 2001.
- [9] Wegmueller M, Oberle M, Felber N, *et al.* Digital data communication through the human body for biomedical monitoring sensor [J]. *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*, 2007: 608-612.
- [10] Hwang J H, Myoung H J, Kang T W, *et al.* Effects of transmitter's location on the signal loss of the human body communication [C]//Antennas and Propagation Society International Symposium. 2008.
- [11] Wegmueller M S, Oberle M, Felber N, *et al.* Galvanical coupling for data transmission through the human body [C]. Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2006, Proceedings of the IEEE, Sorrento: 2006.
- [12] Song S, Cho N, Kim S, *et al.* A 2Mb/s wideband pulse transceiver with direct-coupled interface for human-body communications[C]. Piscataway, NJ, 2006.
- [13] Tebje L, Dorn H, Danker-Hopfe H, *et al.* A method for transmitting data in a body area network (BAN) using capacitive coupling [J]. *Technology and Health Care*, 2004, 12(2): 146-149.
- [14] Zimmerman T G. Personal area networks (PAN): Near-field intra-body communication[D]. Cambridge: MIT Media Lab, 1995.

(责任编辑 代丽)

·学术动态·



“2011 农业工程新技术国际 学术会议”征文

中国农业工程学会将于 2011 年 5 月 27 日在山东淄博召开“2011 农业工程新技术国际会议”。

征文内容:

1) 农业工程新技术、新进展;保护性耕作技术及机具研究;变量施肥及精确喷药技术;复式中耕作业及除草机械;联合收获机减振、优化、可靠性及智能化设计技术;经济类作物联合收获技术与机具;林果采集、秸秆收集及高效生态化利用技术;设施农业控制、高产新技术;种子清选、加工、干燥、贮藏新技术;生物系统虚拟建模与可视化仿真研究;农业装备虚拟样机、虚拟试验及可靠性设计方法;生物芯片、生物传感器和生物仪器的智能设计;精准农业技术、装备与仪器;大中型拖拉机及配套机具的设计、制造及运用;汽车、发动机和农业装备中的节能及智能计算。

2) 支撑低碳农业及可持续发展的农业工程新技术;土壤有机碳库组分、有机碳的稳定性与农田生产力;循环型农业工程技术;节水灌溉及农业节能减排新技术;提高农业装备作业效率的技术、措施及模式;生态农业、绿色农业、有机农业、观光农业等新模式。

3) 太阳能、风能、生物质能利用新技术;太阳能建筑、温室及光伏发电技术;风光互补发电系统及风能独立发电系统;大型风力发电机设计、控制及并网技术;生物质能利用新技术(秸秆、能源作物、林木、海藻等生物质能源转化应用原理与技术)。

4) 食品及农产品品质分析及质量安全检测控制新技术;色谱技术在食品、农产品检测分析中的应用;质谱技术在食品、农产品检测分析中的应用;光谱技术在食品、农产品检测分析中的应用;食品、农产品的生物检测方法;食品、农产品快速检测技术及可追溯系统研究与应用;食品、农产品加工新技术。

征文截止时间:2011 年 2 月 20 日。

联系方式:山东省淄博市张周路 12 号山东理工大学农业工程与食品科学学院(255049);传真:0533-2786896;电子邮箱:aent2011@gmail.com。

会议网址: <http://icae2011.sdut.edu.cn>。