

# 基于无线传感器网络虚拟 MIMO 系统盲均衡

张振洲,于舒娟,张 昀

(南京邮电大学 电子科学与工程学院,江苏 南京 210003)

**摘要:**无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是近年来人们研究的热点。针对无线传感器网络高密度分布的特点,在无线传感器网络进行分簇处理的基础上,文中构造了一种新的虚拟 MIMO 系统模型,并且针对传统的盲均衡算法进行改进,提出一种新的适用于无线传感网的 TXK\_Z 盲均衡算法,最后对该虚拟 MIMO 系统利用文中提出的 TXK\_Z 算法进行盲均衡的仿真实验。实验表明,跟传统的盲均衡算法相比,在低信噪比、短数据的环境下,改进后算法的误码率明显降低,性能显著提高。

**关键词:**无线传感器网络;虚拟 MIMO;扰码;盲均衡

中图分类号:TP301.6

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)03-0031-03

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.03.008

## System Blind Equalization of Virtual MIMO Based on WSN

ZHANG Zhen-zhou, YU Shu-juan, ZHANG Yun

(College of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of

Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** WSN is a research hotspot in recent years. In the light of the characteristics of high-density for WSN, based on clustering for processing in the WSN, construct a new virtual MIMO system model, and the traditional blind equalization algorithm is improved, further more, propose a new blind equalization algorithm of TXK\_Z for WSN. At last, use proposed TXK\_Z blind equalization algorithm to simulate on the virtual MIMO system. Experimental results show that compared with the traditional blind equalization algorithms, the improved algorithm significantly lowers bit error ratio and raises performance significantly under low SNR and short data environment.

**Key words:** WSN; virtual MIMO; scrambling code; blind equalization

## 0 引言

近年来,无线传感器网络技术迅猛发展,国际上提出了一种针对无线传感器网络的虚拟 MIMO 技术。文献[1]指出, MIMO 系统要求多个发送阵列天线的间距大于 10 倍的信号波长<sup>[2]</sup>,才能建立起多个相互独立的子信道,而传感器节点由于体积限制<sup>[3-4]</sup>无法满足这个基本要求,因此一种虚拟 MIMO 技术被提了出来。文献[5-6]较早提出虚拟 MIMO 方案,基于无线传感网的虚拟 MIMO 传输技术的研究也成为了一个热点,对于盲均衡技术的研究也提出了新的要求。盲均衡是一种以盲的或自恢复形式进行均衡的总称。它是一种不借助训练序列就可以使均衡器的输出信号尽量接近发送信号的均衡技术。

文中在研究了文献[7-8]中提到的无线传感器网

络模型的基础上,构造了一种新的基于多簇的虚拟 MIMO 系统模型,并且将盲均衡应用到无线传感器网络之中,利用文中改进的 TXK 算法对该模型进行盲均衡的实验仿真,通过仿真实验可以看到,改进后的 TXK\_Z 算法的误码率明显低于传统的 TXK 算法,而且该算法也适用于短数据的处理。

## 1 无线传感器网络的虚拟 MIMO 系统模型

文献[7]提出了一种三层无线传感器网络的模型,三层网络分别由微网、中层网和指控中心构成,微网由距离较近的传感器节点构成一个簇,簇内多个单天线的传感器节点构成一个虚拟 MIMO 系统的多根发射天线,而中层网节点负责接收微网发送的数据,并通过基站把接收的数据接入指控中心。当簇内节点距离

收稿日期:2013-05-30

修回日期:2013-09-03

网络出版时间:2014-01-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60772060,61104103);南京邮电大学青蓝工程基金(NY210037)

作者简介:张振洲(1987-),男,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为智能信息处理;于舒娟,副教授,硕士研究生导师,研究方向为现代通信中的信号处理和智能信息处理技术。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140107.1650.033.html>

较近时,上述模型无法满足 MIMO 系统各子信道相互独立的条件限制,因此文中构造了一种基于多簇的虚拟 MIMO 系统模型,如图 1 所示。

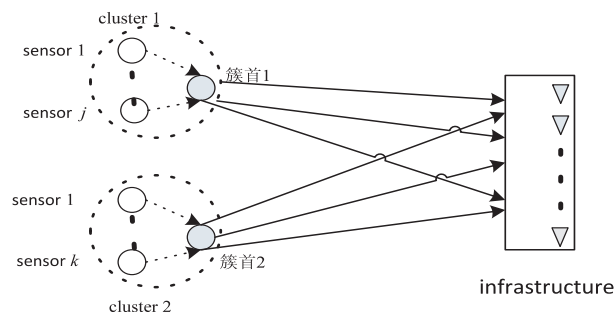


图 1 虚拟 MIMO 原理框图

cluster 1 和 cluster 2 是无线传感器网络中的两个簇（微网），infrastructure 属于中层网络。

构造过程具体分为如下四个阶段：

(1) 建簇阶段：在开始阶段所有节点将按照 LEACH 协议<sup>[9-10]</sup>选出簇首，节点成为簇首后会广播当选消息，其余节点则根据收到的簇首信息加入距离最近的分簇，成员节点向簇首发送的信息包括节点 ID、到簇首的距离、剩余能量等。

(2) 数据收集阶段：簇内节点由于距离近，收集到的数据高度相关，当这些普通节点（每个簇内除簇首外的节点）把收集到的信息通过单输入单输出（SISO）方式发送到簇首后，簇首会对收集到的数据进行融合，消除大量冗余。

(3) 数据传输阶段：经过数据融合后，临近的几个簇首可以根据某些协议构成一个虚拟的 MIMO 系统，把数据发送到一个具有多天线接收的中层网节点。

(4) 盲均衡阶段：中层网节点对接收到的数据利用文中提出的 TXK\_Z 算法进行盲均衡。

其中传感器节点有如下假设：

所有节点都有唯一的 ID 标识，且具有数据融合功能<sup>[7]</sup>，且均已经完成时钟同步。

## 2 TXK\_Z 盲均衡算法

文中参考文献[11]提出的 TXK\_Z 盲均衡算法原理框图，如图 2 所示。

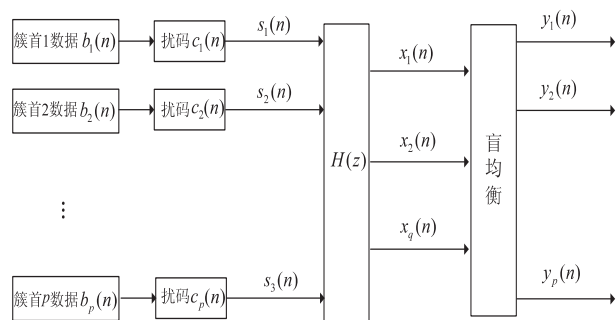


图 2 TXK\_Z 盲均衡算法原理框图

这里  $p$  为输入端天线数，也即多簇的个数， $q$  为输出端天线数， $b_i(n)$  ( $i = 1, 2, \dots, p$ ) 为单个簇融合后的簇首发送数据，在传输数据之前，对数据  $b_i(n)$  进行加扰。加扰后的输出数据为  $s_i(n)$ ， $x_j(k)$  ( $j = 1, 2, \dots, q$ ) 为接收端信号，设  $h_{i,j}$  为 MIMO 系统天线  $i$  到天线  $j$  的信道。

当采用  $L$  阶滤波器对接收信号进行均衡时，长度为  $(L+1)q$  的接收信号向量可以表述为：

$$(x_L(n))_{(L+1)q \times 1} = \mathbf{F}_L(H) \cdot (s_{M+L}(n))_{(M+L+1) \times 1} + v_L(n) \quad (1)$$

其中， $M = \max\{M_i \mid i = 1, \dots, p\}$ ， $M_i$  为子信道  $H_i$  的阶数； $x_L(n) = [x^T(n), \dots, x^T(n-L)]^T$ ； $s_{M+L}(n) = [s_p^T(n), \dots, s_p^T(n-M-L)]^T$ ； $v_L(n) \in R^{(L+1)q}$  为噪声向量；信道卷积矩阵  $\mathbf{F}_L(H)$  是由  $h_{i,j}$  构成的块 Toeplitz 矩阵， $\mathbf{F}_L(H) \in R^{q(L+1) \times p(M+L+1)}$  具体形式为：

$$\mathbf{F}_L(H) = \begin{bmatrix} H(0) & H(1) & \dots & H(M) & 0_{q \times 1} & \dots & 0_{q \times 1} \\ 0_{q \times 1} & H(0) & \dots & \dots & H(M) & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0_{q \times 1} \\ 0_{q \times 1} & \dots & 0_{q \times 1} & H(0) & \dots & \dots & H(M) \end{bmatrix}_{q(L+1) \times p(M+L+1)} \quad (2)$$

文中利用改进的 TXK\_Z 盲均衡算法辨识出  $\mathbf{F}_L(H)$ ，进而恢复出原数据。其中可盲辨识的主要信道条件是  $\mathbf{F}_L(H)$  列满秩。

文中所提出的新 TXK\_Z 盲均衡算法的原理是通过引入扰码<sup>[12]</sup>来提高经典 TXK 算法的性能，其中扰码有如下假设：

(1) 扰码  $c_i(n)$  具有零均值和单位能量，即

$$\lim_{M_c \rightarrow \infty} (1/M_c) \sum_{n=1}^{M_c} c_i(n) = 0, |c_i(n)|^2 = 1.$$

(2) 扰码之间互相关性非常小，即

$$\lim_{M_c \rightarrow \infty} (1/M_c) \sum_{n=1}^{M_c} c_i(n) c_j(n) = 0.$$

文中将采用不同的  $m$  序列伪随机码作为扰码。TXK\_Z 求解过程大致如下：

(1) 数据在传输前进行  $m$  序列加扰，得到  $s_{M+L}(n) = [s_p^T(n), \dots, s_p^T(n-M-L)]^T$ 。

(2) 将  $(L+1)$  个连续的观测数据连接成  $x_L(n) = [x^T(n), \dots, x^T(n-L)]^T$ 。

(3) 对协方差矩阵  $\mathbf{R}_x(0) = E\{x_L(n)x_L^T(n)\}$  进行奇异值分解，得到  $\mathbf{U}_s$  与  $\mathbf{\Sigma}_s$ ，进而求得白化矩阵  $\mathbf{F} = \mathbf{\Sigma}_s^{-1} \mathbf{U}_s^H$ 。

(4) 求得协方差矩阵  $\mathbf{R}_x(1) = E\{x_L(n)x_L^T(n-1)\}$ ，对  $\mathbf{D} = \mathbf{F} \mathbf{R}_x(1) \mathbf{F}^H$  进行奇异值分解，得到： $\mathbf{D} = [Y_1, \dots, Y_d] \cdot \text{diag}(r_1^2, \dots, r_{d-1}^2, 0, \dots, 0) \cdot [Z_1, \dots, Z_d]^H$ ，进而求得  $Z_d$ ，于是可得到信道块 Toeplitz 矩阵为：

$\Gamma_L(H) = \mathbf{U}_s \Sigma_s [(D^+)^{d-1} \mathbf{Z}_d, \dots, (D^+) \mathbf{Z}_d, \mathbf{Z}_d]^H$ 。

(5)最后求得信号  $s_{M+L}(k)^{\wedge} = (\Gamma_L(H))^{\#} \cdot x_L(k)$  , 进行解扰便可恢复出原数据。

3 Matlab 仿真实验

实验 1:使用传统的 TXK 算法对虚拟 MIMO 系统进行盲均衡的 Matlab 仿真实验,此处使用的发送序列为 BPSK 信号,数据长度  $N_s = 200$ ,噪声为高斯白噪声,实验经过 100 次 Monte Carlo 实验而得。信道为二径合成的随机信道,采用 2 输入/3 输出有限冲激响应 MIMO 系统,  $p = 2, q = 3$ 。图 3 为两个用户在不同信噪比下误码率 (BER) 比较。

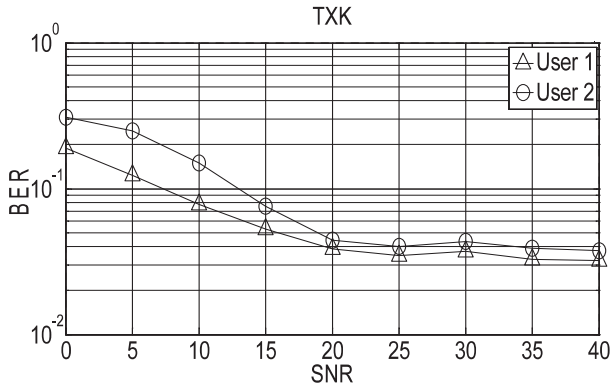


图 3 两用户 TXK 算法误码率比较

实验表明:在利用传统的 TXK 算法处理 2 用户虚拟 MIMO 系统的盲均衡时,误码率较大。

实验 2:使用文中改进后的 TXK\_Z 算法对虚拟 MIMO 传输系统的盲均衡进行 Matlab 实验仿真,这里使用的发送序列为 BPSK 信号,数据长度  $N_s = 20$ ,噪声为高斯白噪声,实验经过 100 次 Monte Carlo 实验而得。信道为二径合成的随机信道,采用 2 输入/3 输出有限冲激响应虚拟 MIMO 系统,  $p = 2, q = 3$ , 扰码为 2 个 4 阶 m 序列。图 4 为两个用户在不同信噪比下误码率 (BER) 比较。

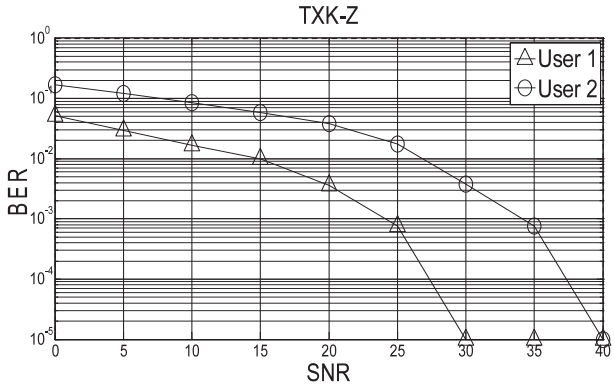


图 4 两用户 4 阶 TXK\_Z 算法误码率比较

实验表明:与实验 1 相比,在发送数据长度变短的情况下,使用文中提出的新的 TXK\_Z 算法对 2 用户虚拟 MIMO 系统进行盲均衡,误码率相比传统的 TXK 算

法会有明显的降低,性能得到了极大的提升。

实验 3:在与实验 2 使用不同阶数扰码的情况下,使用文中提出的 TXK\_Z 算法对虚拟 MIMO 传输系统的盲均衡进行 Matlab 实验仿真,此处使用的扰码为 2 个 5 阶的 m 序列,其他参数设置与实验 2 相同,图 5 为两个用户在不同信噪比下误码率 (BER) 比较。

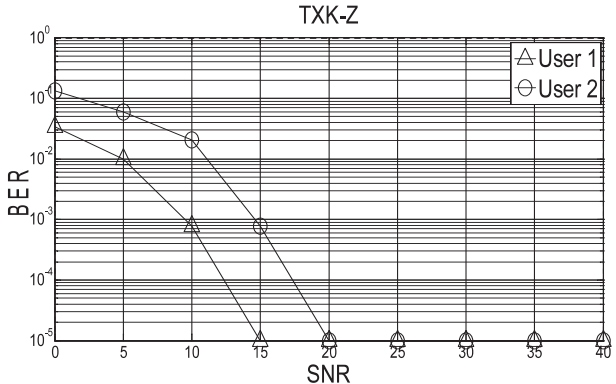


图 5 两用户 5 阶 TXK\_Z 算法误码率比较

实验表明:与实验 2 中的图 4 相比,随着扰码阶数的增加,使用文中提出的新的 TXK\_Z 算法对 2 用户虚拟 MIMO 系统进行盲均衡,误码率会有更明显的降低。

4 结束语

文中在构造了一种新的无线传感器网络虚拟 MIMO 模型的基础上,提出了一种新的基于无线传感器网络虚拟 MIMO 模型的 TXZ\_Z 盲均衡算法,该算法是对传统的 TXK 盲均衡算法的改进,改进后的算法的误码率明显降低,且随着扰码阶数的增加,性能也随之提升,而且该算法适用于短数据的处理。

参考文献:

[1] 王 俊. MIMO 系统盲均衡新算法研究[D]. 南京:南京邮电大学,2005.

[2] 杨 维. 移动通信中的阵列天线技术[M]. 北京:清华大学出版社有限公司,2005.

[3] 程 波. 无线传感器网络虚拟 MIMO 接收技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2007.

[4] 苑玉召. 无线传感器网络中结合网络编码的虚拟 MIMO 传输技术研究[D]. 合肥:安徽大学,2012.

[5] Cui S, Goldsmith A J, Bahai A. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks[J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2004, 22 (6):1089-1098.

[6] Nosratinia A, Hunter T E, Hedayat A. Cooperative communication in wireless networks[J]. Communications Magazine, 2004, 42(10):74-80.

[7] 邱云周. 无线传感网虚拟 MIMO 关键技术研究[D]. 上海:中国科学院上海微系统与信息技术研究所,2007.

表 4 实验 1 结果比较

测试 次数	失效 次数	流程实际 可靠性	误差率 /%	测试 次数	失效 次数	流程实际 可靠性	误差率 /%
1 000	112	0.888	0.65	6 000	642	0.893	0.08
2 000	209	0.895 5	0.19	7 000	736	0.894 86	0.12
3 000	338	0.887 3	0.7	8 000	850	0.893 75	0.004 4
4 000	447	0.888 25	0.62	9 000	967	0.892 6	0.14
5 000	532	0.893 6	0.02	10 000	1 084	0.891 6	0.2

实验通过.NET workflow 平台,对流程中的每个活动设置不同的失效率。通过程序控制,活动在设置的概率下,弹出错误信息。实验采用了 10 组典型数据进行测试,从而观测当活动失效率不同时,对于计算误差的影响。测试数据集流程执行次数为 1 000 次。测试结果如表 5 所示。

表 5 实验 2 测试数据集

数据 集	流程计算 可靠性	流程实际 可靠性	误差率 /%	数据 集	流程计算 可靠性	流程实际 可靠性	误差率 /%
1	0.795 43	0.788	0.8	6	0.941 48	0.954	1.36
2	0.589 8	0.578	1.9	7	0.160 88	0.164	1.9
3	0.615 89	0.624	1.3	8	0.989 45	0.987	0.25
4	0.415 23	0.42	1.14	9	0.972 84	0.976	0.32
5	0.868 3	0.859	1.05	10	0.954 31	0.941	1.41

根据测试数据发现,对于活动可靠性较高的流程,系统计算的误差率较为准确,而对于活动可靠性较低的流程,计算误差率则比较大。计算误差率小于 2%。

6 结束语

文中提出了一套完整的基于流程的工作流可靠性评估算法。文中的创新点在于从活动的类型、失效情况以及活动转移方式进行分析,并通过改进马尔可夫算法,使之能满足工作流的活动转移方式。与现有基于路径的工作流可靠性评估算法相比,文中采用马尔可夫算法,在实现建模时仅需要考虑流程的一步转移概率,并不需要陷入复杂的流程分解与计算之中,更可以解决活动流转模式互相嵌套的问题。基于该算法,实现了基于工作流的可靠性评估软件,并通过实验对

比,验证了工作流可靠性评估算法的正确性。

参考文献:

[1] Michael R. 软件可靠性工程手册[M]. 北京:电子工业出版社,1997.

[2] 侯志松,余周,冯启高. workflow 管理系统开发实录[M]. 北京:中国铁道出版社,2010.

[3] 林晖,赵泽超,张优云. workflow 系统模型的建立及其可靠性的评价[J]. 机械工程学报,2001,37(2):48-54.

[4] 王晓宏,孙壮志. 计算机协同设计中工作流可靠性的研究[J]. 计算机工程与应用,2003,39(3):47-49.

[5] Coppolino L, Romano L, Mazzocca N, et al. Web services workflow reliability estimation through reliability patterns[C]//Proc of third international conference on security and privacy in communications networks and the workshops. France:IEEE Conference Publications,2007.

[6] Zhao Shi,Lu Xiaoming,Zhou Xianzhong. A reliability model for Web services from the consumers' perspective[C]//Proc of CSSS. Nanjing:IEEE Conference Publications,2011.

[7] Grassi V,Patella S. Reliability prediction for service-oriented computing environments[J]. Internet Computing, 2006, 10(3):43-49.

[8] van der Aalst W,van Hee K,王建民,等. workflow 管理-模型、方法和系统[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

[9] 范玉顺. 集成化企业建模方法与系统[M]. 北京:中国电力出版社,2007.

[10] van der Aalst W M P,ter Hofstede A H M,Kiepuszewski B. Workflow patterns[J]. Distributed and parallel database, 2003,14(1):5-51.

[11] Cheung R C. A user-oriented software reliability model[J]. Software engineering,1980,6(2):118-125.

[12] Reussner R H,Schmidt H W,Poernomo I H. Reliability prediction for component-based software architectures[J]. The journal of systems and software,2003,66(3):241-252.

[13] Xie M,Wohlin C. An additive reliability model for the analysis of modular software failure data[C]//Proc of software reliability engineering. Toulouse:IEEE Conference Publications, 1995.

[14] 张春艳. 基于 Web 服务的支持虚拟企业 workflow 技术的研究[D]. 福州:福州大学,2006.

(上接第 33 页)

[8] 丁杰. 新型高效协作式移动无线传感器网络技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2012.

[9] 肖明. 无线传感器网络中基于分簇的虚拟 MIMO 传输策略的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2011.

[10] Heinzelman W B,Chandrakasan A P,Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE transactions on wireless communica-

tions,2002,1(4):660-670.

[11] 刘卫平. 地面战场无线传感侦察系统中的盲信号处理问题研究[D]. 南京:南京邮电大学,2013.

[12] Li X. Blind channel estimation and equalization in wireless sensor networks based on correlations among sensors[J]. IEEE transactions on signal processing,2005,53(4):1511-1519.

基于无线传感器网络虚拟MIMO系统盲均衡

作者：[张振洲](#)，[于舒娟](#)，[张昀](#)，[ZHANG Zhen-zhou](#)，[YU Shu-juan](#)，[ZHANG Yun](#)

作者单位：[南京邮电大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京, 210003](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

ISTIC

年，卷(期)：2014(3)

本文链接：[http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjfz201403008.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201403008.aspx)