

Fault-Tolerance Based on Network Coding in Wireless Body Area Networks for Posture Detection

Jie Xing^{1,2,3}, Tuanfa Qin^{1,2,3}, Yunfan Meng^{1,2,3}, Haibin Wan^{1,2,3}

¹School of Computer and Electronic Information, Guangxi University (GXU), Nanning Guangxi

²Guangxi Key Laboratory of Multimedia Communications and Network Technology (Cultivating Base), Guangxi University (GXU), Nanning Guangxi

³Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Multimedia Communications and Information Processing, Guangxi University (GXU), Nanning Guangxi

Email: xingjie@mail.gxu.cn, tfqin@gxu.edu.cn, yunfanmeng@126.com, hbwan@gxu.edu.cn

Received: Jan. 24th, 2015; accepted: Feb. 6th, 2015; published: Feb. 10th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Wireless body area networks consisting of accelerometer for posture detection have been widely used in the field of medicine, sports, etc. It needs to have a high reliability of communication. Therefore, the fault-tolerance of body area networks for posture detection is one of the key issues to be resolved. Network coding along with redundancy can be used as a very efficient error recovery mechanism that greatly improves body area networks for posture detection reliability at very low computational and hardware cost. Two error recovery mechanisms based on network coding are proposed, i.e. the source node coding and the relay node coding. Simulation results show that the error recovery capability of the network using network coding can improve about 90 percent. And when failure occurs in a single relay, the network using relay node coding still has better error recovery capabilities.

Keywords

Wireless Body Area Network, Accelerometer, Network Coding, Error Recovery

基于网络编码姿态监控体域网的容错性

邢 杰^{1,2,3}, 覃团发^{1,2,3}, 蒙云番^{1,2,3}, 万海斌^{1,2,3}

¹广西大学计算机与电子信息学院, 广西 南宁

²广西大学多媒体通信与网络技术重点实验室培育基地, 广西 南宁

³广西大学高校多媒体通信与信息处理重点实验室, 广西 南宁

Email: xingjie@mail.gxu.cn, tfqin@gxu.edu.cn, yunfanmeng@126.com, hbwan@gxu.edu.cn

收稿日期: 2015年1月24日; 录用日期: 2015年2月6日; 发布日期: 2015年2月10日

摘要

由加速度传感器构成的姿态监控体域网被广泛应用于医学、运动等领域,其需要具备较高的通信可靠性,因此,姿态监控体域网的容错性是需要解决的关键问题之一。网络编码的冗余可以作为一种非常有效的错误恢复机制,在非常低的计算和硬件成本下大大提高姿态监控体域网的可靠性。本文提出在源节点和在中继节点进行网络编码的两种错误恢复机制。仿真实验结果表明采用网络编码后的网络纠错能力能提高90%左右,并且在单个中继出现失效的情况下,采用中继节点编码的网络仍然具有较好的错误恢复能力。

关键词

无线体域网, 加速度传感器, 网络编码, 错误恢复

1. 引言

无线体域网是监控人体各项生理指标的网络,主要是在人体各个部位通过穿戴或植入方式布置传感器,采集相应的生理信息[1]。而姿态监控则主要通过运用加速度传感器,采集当前人体某部位的加速度来判断人的行为和动作[2][3]。当前的视频监控已经被广泛应用,而且能够实现对人体的简单动作的智能判断,但是视频监控有它自身的局限性。最显然的缺点是它不能够有效的保护被监控人的隐私,而且在视频监控范围以外无法进行监控。因此运用体域网的相关技术,对人体姿态监控便显得尤为重要。文献[2]中提出了利用三轴加速度传感器来监测人体的简单动作。文献[4]中提出通过分析布置在人体各部位的加速度传感器所传回的信息,来判断人的具体伤情,并且还可以据此信息指导其进行恢复训练;该方法提供了一种远程诊断和恢复的机制。文献[5]中提出将加速度传感器布置于交警手背,以采集判断交警手势信息,从而可以据此信息来控制交通信号灯。网络编码不仅具有提高信道利用率、增加网络吞吐量等优点,还可以提高网络的可靠性。因此把网络编码应用到体域网中已经成为当前的研究热点。例如,文献[6]在体域网中应用网络编码,网络的吞吐量得以提高。文献[7]提出了结合网络编码的节能算法,该算法可以降低整个网络能耗。文献[8]中提出在水下的传感器网络中,结合网络编码和多径路由,提出一种有效的纠错机制,通过减少自动重复请求来改善数据传递的可靠性。文献[9]中提出在一种树形拓扑结构的网络中,网络编码作为其中一种最优的可靠性机制,可以有效的恢复丢失的数据包,提高网络的容错性。运用网络编码提高通信的可靠性在文献[10]中也有体现,当一个节点感知到不同无线连接的丢包情况时,网络编码可以使网络的可靠性增强。

本文提出在多源多中继的姿态监控体域网中运用网络编码技术以提高网络的容错性能。首先,对加速度传感器特点进行分析,提出在源节点进行网络编码的方式;其次,引入一种在中继节点进行网络编码的方式,并结合其特点加以改进。两种编码方式在解码端都可以采用相同的解码机制。在本文中采用丢包率作为网络纠错能力的评价标准。首先通过仿真实验测试网络丢包率,评价网络的纠错能力,并对

比各种编码方式的优劣;然后测试在单个中继损坏的情况下,本文提出的编码方式下的网络的纠错能力。

2. 网络结构

在姿态监控的体域网中,采用的传感器一般为三轴加速度传感器,通过对相互正交的三个方向的加速度实时测量,来判断传感器所处位置动作的速度和方向。对布置在各个位置上的传感器所传回的实时信息的分析判断,可以得出被监控者在某一时刻正在进行的动作,从而可以起到对被监控者进行姿态监控的目的(图 1)。

在体域网中,传感器被布置在人体各个位置,以达到监控人体各项生理指标的目的。所以传感器或是随衣服穿戴在身体上,或是被植入身体内。这就要求传感器的体积要小、重量要轻。但是,传感器模块不仅要测量相应的数据,而且还要负责数据的发送,这就要求在较小的传感器模块体积内共存几个小模块,因此供电是一个无法忽略的问题。与此同时,在较小的空间内,传感器的发射天线的功率很低、传输距离短,因此需要一些功率稍大的中继节点来保障信号的传输。中继节点会配备优质的发射天线,拥有较大的发射功率,所以中继节点通过一定的设计可以完成更多的功能,比如可以对所接收到的信号进行网络编码。众所周知网络编码具有提升网络吞吐量、提高带宽利用率、均衡网络负载等优点。

基于基本的姿态监控网络模型,网络拓扑的构造如图 2 所示。网络由 n 个源节点, n 个中继节点,一个目的节点组成。为了方便进行仿真实验,我们选用四源四中继的网络。图 2 中 $S_1 \sim S_4$ 为源节点, $R_1 \sim R_4$ 为中继节点, SN 为目的节点。

源节点中的三轴加速度传感器每次需要测量同一时刻相互正交的三个方向的加速度,假定 x, y, z 三个轴的加速度信息,分为三个独立的信息包。如图 2,每个传感器节点同时发送数据到两个中继节点,同时每个中继节点也接收到两个传感器节点发送的信息。传感器与中继节点的接收发送规则如下所示:

$$R_1: \{S_1, S_2\}, R_2: \{S_2, S_3\}, R_3: \{S_3, S_4\}, R_4: \{S_4, S_1\}$$

每个三轴加速度传感器在一个时钟周期内发送三个信息包,分别包含 x, y, z 三个轴的信息。因此每个中继节点在一个时钟周期内会收到来自两个传感器的六个信息包。

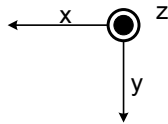


Figure 1. Tri-axial accelerometer general architecture
图 1. 三轴加速度传感器测量方向示意图

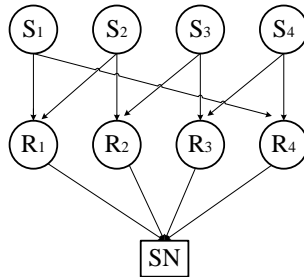


Figure 2. Network topology
图 2. 网络拓扑

3. 编码与解码方式

3.1. 编码方式

由于三轴加速度传感器的特殊性，其每次测量都会产生三个信息包，因此可以考虑在源节点即在加速度传感器端对其进行网络编码，同时也可以考虑在中继节点对所收到的信息包进行网络编码。下面将介绍两种不同的编码方式。

为了方便表示，每个源节点一次所产生的信息包如下所示：

$$S_1: \{P_1, P_2, P_3\}, S_2: \{P_4, P_5, P_6\}, S_3: \{P_7, P_8, P_9\}, S_4: \{P_{10}, P_{11}, P_{12}\}$$

在时域进行世代(generation)划分，在同一时间各个传感器产生的十二个信息包视为同一世代，在每一个信息包中都会有世代的识别码(generation ID) [11]。同一世代的信息包才能进行网络编码操作。

1) 在源节点进行网络编码

首先介绍在源节点进行网络编码的方式，由于加速度传感器测量产生三个信息包，所以我们将待发送的三个信息包在源节点进行网络编码，中继节点仅负责数据的接收和转发，不进行任何编码。在源节点将同一世代的三个信息包不进行任何编码发送至中继节点，同时再将这一世代的三个信息包两两异或，并发送至另一中继节点。例如，在图 2 中， S_1 将同一世代未编码信息包发送至 R_1 ，将两两异或的三个信息包发送至中继节点 R_4 。根据图 2 中所示信息流，得出每个中继所接收到的同一世代的信息包如表 1。

源节点的编码方式没有充分的利用中继节点，所以网络的纠错能力会有所限制，下面将介绍利用中继节点进行网络编码方法。

2) 在中继节点进行网络编码

下面将介绍第二种编码方式，即在中继节点进行网络编码，源节点只发送原始数据，不进行任何编码。文献[12]中介绍了在体域网中运用网络编码的方法，其编码方式也适用于姿态监控体域网。首先，介绍文献[12]中的编码方式。中继节点将对得到的六个信息包进行异或网络编码。假设中继节点接收到属于同一世代的信息包的集合为 $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6\}$ ，发送到目的节点的包的集合为 $C = \{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6\}$ 。编码公式如下：

$$C_1 = U_1, C_2 = U_2, \dots, C_k = U_k, C_{k+1} = U_{k+1} \oplus U_{k+2}, \dots, C_{n-1} = U_{n-1} \oplus U_n, C_n = U_n \oplus U_1 \quad (1)$$

其中 k 代表，在中继节点接收到同一世代的六个信息包中，没有参与异或运算的信息包的个数。 k 的值会影响编码的效果，在[12]中 k 为 2 时纠错能力最强。当 $k = 2$ 时，在中继节点编码后的数据包，如表 2 所示。

在运用公式 1 进行网络编码的前提下， $k = 2$ 时纠错能力最好，但是当 $k = 1$ 或 $k = 3$ 时与 $k = 2$ 时的网络纠错能力相差不大。对 k 为 1 时的编码进行分析，发现 k 为 1 时可以通过改进编码公式提升编码的错误恢复能力。当 k 为 1 时各中继编码如表 3。

通过对比发现，在进行过异或运算的信息包中， C_2 和 C_5 所对应的信息包重复出现，这种情况会降低

Table 1. Packets in relays for coding in source
表 1. 源节点编码中继节点数据包示意表

中继	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
R_1	P_1	P_2	P_3	$P_4 \oplus P_5$	$P_4 \oplus P_6$	$P_5 \oplus P_6$
R_2	P_4	P_5	P_6	$P_7 \oplus P_8$	$P_7 \oplus P_9$	$P_8 \oplus P_9$
R_3	P_7	P_8	P_9	$P_{10} \oplus P_{11}$	$P_{10} \oplus P_{12}$	$P_{11} \oplus P_{12}$
R_4	P_{10}	P_{11}	P_{12}	$P_1 \oplus P_2$	$P_1 \oplus P_3$	$P_2 \oplus P_3$

译码矩阵中的译码性能。因为译码矩阵中包含的非零元素越多，那么其纠错能力越强，但是这种情况译码矩阵中的元素会较 $k=2$ 时减少四个，所以纠错能力不如 $k=2$ 时的编码方式。为了能够将所发送的信息全部利用，可以对 $k=1$ 时的编码公式进行改进，使所传输的数据包不再重复。为了增加传感器之间的相关性，改进的编码是将两个传感器之间的包进行异或，每个中继的编码方式如下：

$$C_1 = U_1, C_2 = U_2 \oplus U_3, C_3 = U_3 \oplus U_4, C_4 = U_4 \oplus U_5, C_5 = U_5 \oplus U_6, C_6 = U_6 \oplus U_1 \quad (2)$$

编码后如表 4 所示，具体效果会在下章会通过仿真实验验证。

3.2. 解码

首先令 $P_{mm} = P_m \oplus P_n$ 。在接收端，把接收到的数据包，存入缓存，同一世代的数据包构成矩阵 D 以备解码，矩阵 D 如下：

$$D = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & A_{13} & 0 & \cdots & A_{1n} \\ 0 & 0 & 0 & A_{11} & \cdots & 0 \\ 0 & A_{32} & 0 & 0 & \cdots & A_{3n} \\ 0 & 0 & 0 & A_{11} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & 0 & 0 & A_{n4} & \cdots & A_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Table 2. Packet coding in relay and $k=2$
表 2. $k=2$ 时编码示意表

中继	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
R_1	P_1	P_2	$P_3 \oplus P_4$	$P_4 \oplus P_5$	$P_5 \oplus P_6$	$P_6 \oplus P_1$
R_2	P_4	P_5	$P_6 \oplus P_7$	$P_7 \oplus P_8$	$P_8 \oplus P_9$	$P_9 \oplus P_4$
R_3	P_7	P_8	$P_9 \oplus P_{10}$	$P_{10} \oplus P_{11}$	$P_{11} \oplus P_{12}$	$P_{12} \oplus P_7$
R_4	P_{10}	P_{11}	$P_{12} \oplus P_1$	$P_1 \oplus P_2$	$P_2 \oplus P_3$	$P_3 \oplus P_{10}$

Table 3. Packet coding in relay and $k=1$
表 3. $k=1$ 时编码示意表

中继	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
R_1	P_1	$P_2 \oplus P_3$	$P_3 \oplus P_4$	$P_4 \oplus P_5$	$P_5 \oplus P_6$	$P_6 \oplus P_1$
R_2	P_4	$P_5 \oplus P_6$	$P_6 \oplus P_7$	$P_7 \oplus P_8$	$P_8 \oplus P_9$	$P_9 \oplus P_4$
R_3	P_7	$P_8 \oplus P_9$	$P_9 \oplus P_{10}$	$P_{10} \oplus P_{11}$	$P_{11} \oplus P_{12}$	$P_{12} \oplus P_7$
R_4	P_{10}	$P_{11} \oplus P_{12}$	$P_{12} \oplus P_1$	$P_1 \oplus P_2$	$P_2 \oplus P_3$	$P_3 \oplus P_{10}$

Table 4. Packet coding in relay with improving
表 4. $k=1$ 时改进编码示意表

中继	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
R_1	P_1	$P_2 \oplus P_3$	$P_3 \oplus P_4$	$P_4 \oplus P_5$	$P_2 \oplus P_6$	$P_6 \oplus P_1$
R_2	P_4	$P_5 \oplus P_6$	$P_6 \oplus P_7$	$P_7 \oplus P_8$	$P_5 \oplus P_9$	$P_9 \oplus P_4$
R_3	P_7	$P_8 \oplus P_9$	$P_9 \oplus P_{10}$	$P_{10} \oplus P_{11}$	$P_8 \oplus P_{12}$	$P_{12} \oplus P_7$
R_4	P_{10}	$P_{11} \oplus P_{12}$	$P_{12} \oplus P_1$	$P_1 \oplus P_2$	$P_{11} \oplus P_3$	$P_3 \oplus P_{10}$

在矩阵中，未编码的包被写入矩阵的对角线，例如， $D(i,i) = P_i$ 。而编码的包则按照自己的编码方式写入矩阵，例如 $D(i,j) = P_i \oplus P_j$ 。矩阵剩余的位置均为零，代表未接收到的包，或者本身就不存在的包。

接着对矩阵进行如下两步操作：

第一步：如果 $D(m,n) \neq 0$ ，那么 $D(n,m) \neq D(m,n)$ 。

解码时，由于 $P_m \oplus P_n = P_n \oplus P_m$ ，而且在第二步解码步骤中主要用矩阵对角线的上半部分来解码，所以此操作可以有效降低丢包率，是解码的重要步骤之一。

第二步：如果 $D(i,i) \neq 0$ 并且 $D(i,j) \neq 0$ ，由于 $D(i,i) = P(i,i)$ ， $D(i,j) = P(i,j)$ ，那么 $P(j,j) = D(i,i) \oplus D(i,j)$ 。当得到 $P(j,j)$ 时，把它写入矩阵，即， $D(j,j) = P(j,j)$ 。同样的过程一直循环，直到无法再译出数据包，这时矩阵对角线上的包，就是所译出的源节点所发送的数据。当一组的所有包解码结束时，矩阵清空，准备接收下一组的数据。

4. 仿真实验结果

在任何通信系统中，有效性和可靠性是必须要考虑的。下面将对这种应用于姿态监控体域网的网络编码方式进行评价。首先，在发送过程中，不采用任何其他纠错检错方式，只应用本文中的网络编码方式。本文所采用的评价指标是网络的丢包率(PLR)。网络的丢包率是指，在目的节点没有收到的包的数量除以总共发送的包的数量。在仿真实验中，我们不断重复数据的发送接收过程，随着重复次数的增加，实验所得丢包率不断接近真实的网络丢包率。误码是造成丢包的主要因素。误码率(BER)取决于信噪比，调制方式等等。而误包率(PER)完全可由误码率计算。计算公式如下：

$$PER = 1 - (1 - BER)^n \quad (4)$$

n 表示数据包中含有的比特数。

通过仿真实验，测试在不同误包率和不同误码率下，采用网络编码的网络的纠错能力。为了保证数据的准确，测试每一个误包率和误码率时，都将数据的发送和接收过程重复 2^{20} 次。

在以上的实验条件下，我们对四种传输方式进行对比。第一种是只发送两遍原始数据，不进行任何编码(No Coding and Transfer Two Times)；第二种是只在源节点进行编码(SNC)；第三种是文献[12]提出的在中继节点进行编码，且 $k = 2$ (RNC1)；第四种是本文提出的基于文献[12]编码方式的改进，此时， $k = 1$ (RNC2)。

图3是在不同误包率的情况下，对四种方式的对比。

从图3中可以发现在相同的误包率下，运用网络编码的方式比不编码的方式具有更好的纠错能力，并且在三种网络编码方式中，本文提出的编码方式，纠错能力最强。

图4是在不同误码率下四种方式的对比。

同样是将原始数据发送两遍，从图4中可以发现经过编码后的纠错能力比不编码的明显加强，而且本文提出的编码方式纠错能力最强。

下面测试当单个中继损坏时，本文提出的编码方式的纠错能力。因为当单个中继损坏时，源节点编码本身会产生丢包，所以丢包率较高，因此只对本文提出的改进编码方式与单独发送一次数据，不进行编码(No Coding and Transfer One Times)的网络进行对比(图5)。

通过对比可以发现在单个中继损坏的情况下，采用网络编码技术，姿态监控体域网依然比不编码网络有较高的纠错能力。

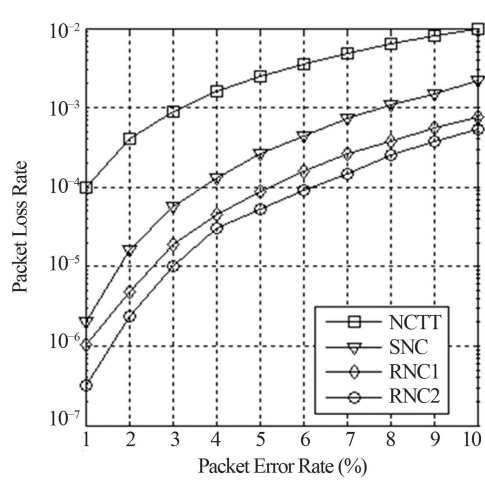


Figure 3. Packet loss rate in different packet error rate
图3. 不同误包率下的丢包率

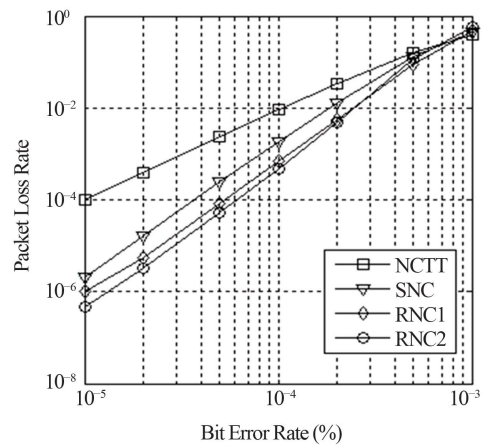


Figure 4. Packet loss rate in different bit error rate
图4. 不同误码率下的丢包率

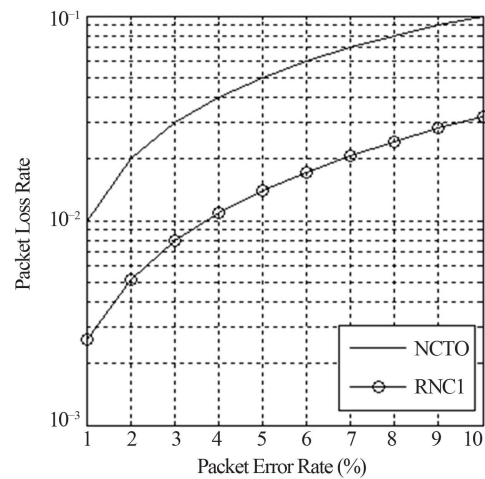


Figure 5. Packet loss rate for one dead relay
图5. 单个中继损坏的丢包率

5. 结论

通过仿真实验,可以发现采用网络编码后网络的错误恢复能力比不采用编码的网络增强 90%左右。并且当一个中继节点无法行使功能时,通过实验也可以得出,采用网络编码的网络,其接收端的丢包率依然比直接传输数据的方式低。所以本文提出的算法,具有较大的实际意义。源节点编码尽管相对其他编码方式略显逊色,但是其译码简单方便,无需较大的译码矩阵,且译码速度也较快,可以考虑将源节点编码与中继节点编码相结合,提高网络性能。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(61261023, 60962002)。

参考文献 (References)

- [1] Ahlswede, R., Cai, N., Li, S.-Y.R. and Yeung, R.W. (2000) Network information flow. *IEEE Transactions on Information Theory*, **46**, 1204-1216.
- [2] Farella, E., Pieracci, A., Benini, L. and Acquaviva, A. (2006) A wireless body area sensor network for posture detection. *Proceedings of 11th IEEE Symposium on Computers and Communications*, 26-29 June 2006, 454-459.
- [3] Lugade, V., Fortune, E., Morrow, M. and Kaufman, K. (2014) Validity of using tri-axial accelerometers to measure human movement—Part I: Posture and movement detection. *Medical Engineering & Physics*, **36**, 169-176.
- [4] 王韧 (2008) 基于无线加速度传感器网络的医疗辅助康复系统. 厦门大学, 厦门.
- [5] Yuan, T. and Wang, B. (2010) Accelerometer-based Chinese traffic police gesture recognition system. *Chinese Journal of Electronics*, **19**, 270-274.
- [6] Arrobo, G.E. and Gitlin, R.D. (2011) Improving the reliability of wireless body area networks. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, **2011**, 2192-2195.
- [7] 闫龙, 覃团发, 李亮亮, 等. 基于网络编码的无线体域网多中继协作节能策略. *电讯技术*, **3**, 355-360.
- [8] Guo, Z., Wang, B. and Cui, J.H. (2007) Efficient error recovery using network coding in underwater sensor networks. In: *NETWORKING 2007. Ad Hoc and Sensor Networks, Wireless Networks, Next Generation Internet*, Springer, Berlin, Heidelberg, 227-238.
- [9] Ghaderi, M., Towsley, D. and Kurose, J. (2008) Reliability gain of network coding in lossy wireless networks. *The 27th IEEE Conference on Computer Communications*, Phoenix, AZ, 13-18 April 2008.
- [10] Rayanchu, S., Sen, S., Wu, J., et al. (2008) Loss-aware network coding for unicast wireless sessions: Design, implementation, and performance evaluation. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, **36**, 85-96.
- [11] Wu, Y., Chou, P.A. and Kung, S.-Y. (2005) Information exchange in wireless networks with network coding and physical-layer broadcast. *Conference on Information Sciences and Systems*, The Johns Hopkins University, Baltimore, 16-18 March 2005, 6 p.
- [12] Marinkovic, S. and Popovici, E. (2009) Network coding for efficient error recovery in wireless sensor networks for medical applications. *First International Conference on Emerging Network Intelligence*, Sliema, 11-16 October 2009, 15-20.

汉斯出版社为全球科研工作者搭建开放的网络学术中文交流平台。自2011年创办以来，汉斯一直保持着稳健快速发展。随着国内外知名高校学者的陆续加入，汉斯电子期刊已被450多所大中华地区高校图书馆的电子资源采用，并被中国知网全文收录，被学术界广为认同。

汉斯出版社是国内开源（Open Access）电子期刊模式的先行者，其创办的所有期刊全部开放阅读，即读者可以通过互联网免费获取期刊内容，在非商业性使用的前提下，读者不支付任何费用就可引用、复制、传播期刊的部分或全部内容。

