

电磁纳米网节能编码方法研究进展

黄龙军^{1,2}, 王万良¹, 姚信威¹, 沈士根^{2,3}, 潘小刚¹

(1. 浙江工业大学计算机科学与技术学院, 浙江杭州 310023; 2. 绍兴文理学院计算机科学与工程系, 浙江绍兴 312000;
3. 嘉兴学院数理与信息工程学院, 浙江嘉兴 314001)

摘 要: 电磁纳米网是采用纳米电磁通信方式的无线纳米传感器网络, 由大量可相互通信的纳米传感器构成. 由于纳米传感器可存储的能量极为有限, 能量有效性成为电磁纳米网中必须优先考虑的重要问题. 在对采用太赫兹通信的无线纳米传感器网络进行概述的基础上, 综述电磁纳米网通信能量相关的开关键控调制方法和节能低码重信道编码的研究现状, 探讨电磁纳米网节能编码需要进一步研究的方向. 目前, 尚鲜见无线纳米传感器网络的中文文献, 期望本文能促进国内对无线纳米传感器网络的关注和研究.

关键词: 无线纳米传感器网络; 太赫兹通信; 低码重编码; 能耗; 开关键控

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2016)08-2018-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.08.035

A Survey on Energy-Efficient Coding for Electromagnetic Nanonetworks

HUANG Long-jun^{1,2}, WANG Wan-liang¹, YAO Xin-wei¹, SHEN Shi-gen^{2,3}, PAN Xiao-gang¹

(1. College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;
2. Department of Computer Science and Engineering, Shaoxing University, Shaoxing, Zhejiang 312000, China;
3. College of Mathematics, Physics and Information Engineering, Jiaxing University, Jiaxing, Zhejiang 314001, China)

Abstract: Wireless nanosensor networks (WNSNs) employing nano-electromagnetic communications, known as electromagnetic nanonetworks, are composed of many nanosensors communicating with each other. Because the nanosensors' energy is extremely limited, the energy efficiency become an important issue in electromagnetic nanonetworks. Firstly, WNSNs using terahertz communication are outlined. Then the state of the art in communication energy of electromagnetic nanonetworks is reviewed, in terms of on-off keying modulation and energy-efficient low-weight channel coding. Finally, the next research focuses of energy-efficient coding for electromagnetic nanonetworks are discussed. So far, Chinese literatures on WNSNs are rare. This work is hoped to forward the internal focuses and research on WNSNs.

Key words: wireless nanosensor networks; terahertz communication; low-weight coding; energy consumption; on-off keying

1 引言

纳米技术源于诺贝尔物理学奖获得者理查德·费曼在 1959 年所作的著名演讲《在底部还有很大空间》(There's Plenty of Room at the Bottom)^[1,2]. 随着纳米技术的发展, 基于石墨烯、碳纳米管、石墨烯纳米带等纳米材料, 可以制造能够完成感知、处理、数据存储、执行等简单任务的纳米元件. 纳米传感器^[1-3]由若干的纳米元件构成, 尺寸仅为若干立方微米. 纳米传感器可以通过相互之间的协作和信息共享在更大的距离范围内分布

式地完成更复杂的任务^[4], 从而构成无线纳米传感器网络(Wireless NanoSensor Networks, WNSN). 纳米传感器之间最主要的通信方式^[3,4]有两种, 即分子通信和纳米电磁通信; 文献[2]广泛讨论了以分子为信息载体的分子通信; 文献[3]详细综述的电磁纳米网(ElectroMagnetic NanoNetworks, EMNN)是采用纳米电磁通信方式的无线纳米传感器网络. 下文中, 无线纳米传感器网络专指电磁纳米网, 不区分地使用 EMNN 和 WNSN. 采用纳米电磁通信时, 纳米传感器节点发射与接收基于新型纳米材料开发的纳米器件所辐射的太赫兹(Terahertz,

THz) 频段电磁波,其频率范围在 $0.1 - 10\text{THz}^{[3,5-7]}$; 因此,纳米电磁通信也可以认为是 WSN 中的太赫兹通信。

纳米传感器节点的能量储存能力极其有限^[8],而纳米传感器在通信、传感、处理等各方面都会产生能耗,因此能量有效性是 EMNN 中必须优先考虑的问题。纳米传感器节点的能量主要消耗在通信方面,现有的 EMNN 编码相关的文献重点关注通信能耗,例如,文献[9~11]讨论通信能耗中的传输能耗的最小化。本文概述 WSN,综述 EMNN 节能编码方法的研究现状,展望 EMNN 编码能量有效性相关的研究方向,期望引起国内对 WSN 的进一步关注,促进 WSN 的理论研究及其在生物医学、工业、环境和军事等诸多领域的先进应用研究,例如先进健康监测系统、纳米物联网、灾害防御系统和核生化防御系统等^[12]。

2 无线纳米传感器网络概述

无线纳米传感器网络中部署了大量可相互通信的纳米传感器节点。通过节点之间的通信,纳米传感器能够以多跳的方式把信息传输到汇聚(Sink)节点^[13]。集成的纳米传感器^[3]如图 1 所示,包含传感、处理、执行、存储、能量、通信等单元,其中,通信单元包括纳米天线和电磁纳米收发器。纳米天线宽度仅有数十纳米,长度为几微米,易于集成到纳米传感器中^[13]。基于碳纳米管、石墨烯等材料的纳米天线^[14,15]及电磁纳米收发器^[16,17]等是实现 WSN 太赫兹通信的基本要素。

根据文献[3,4],WSN 的网络架构包含纳米节点、纳米路由器、微纳米接口设备和网关;例如,健康监测系统的 WSN 网络架构如图 2 所示。其中,纳米传感器和纳米执行器等纳米节点能够完成简单的计算、存储等任务。纳米路由器比纳米节点拥有更多的计算资源,既能对来自纳米传感器的信息进行汇总,又能通过交换简单的命令控制纳米节点的行为。微纳米接口设备是一种混合设备^[3],既可以使用纳米通信技术实现纳米规模的通信,如汇总来自纳米路由器的信息,并在各设备之间进行信息传输,又可以使用常用的通信技术实现传统的网络通信。网关(如智能手机)连接 WSN 和 Internet,既可以转发来自微纳米接口设备的信息到 Internet 上,又使得用户(如医疗服务提供者)能够通过 Internet 对 WSN 进行远程控制^[3,4]。

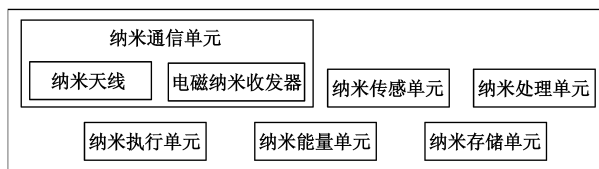


图1 纳米传感器架构

当前,纳米传感器之间的通信问题依然尚未得到解决^[13]。其中,太赫兹频率产生极高的路径损耗^[7]是实现太赫兹通信的主要挑战之一,因此通信距离是太赫兹通信的一个主要约束因素^[7]。在纳米传感器之间实现通信的首个研究挑战^[3]是太赫兹频段信道建模。文献[1,18]详细讨论了 WSN 的信道建模并给出了太赫兹信道路径损耗的计算方法。文献[3]综述了纳米规模太赫兹信道路径损耗(包括传播损耗和分子吸收损耗)、分子噪声、带宽和信道容量、多径传播和纳米粒子散射等特性。关于 EMNN 的信道容量,文献[1]首次进行评估,文献[19]给出了单用户的可用信息率计算方法,文献[13]进一步研究了多用户的信息率。但实现有效、实用的 EMNN 仍然存在诸多挑战;物理层研究方面的挑战^[7]包括调制方法、编码方法、发送器/接收器复杂性均衡、物理层安全等;链路层研究方面的挑战^[7]包括介质访问控制(Medium Access Control,MAC)机制、错误控制策略、数据包大小的设计等。

研究 EMNN 的物理层、链路层等各层解决方案可以使用基于 NS-3(Network Simulator 3)平台的 Nano-Sim^[20,21]、COMSOL^[12]等仿真工具及 HITRAN^[22]分子吸收数据库。

对于大量纳米传感器节点密集部署的 EMNN,需要有新的 MAC 协议来控制信道的访问及协调纳米节点之间的并行传输。物理层感知 MAC 协议^[23]是 EMNN 的首个 MAC 协议,该协议建立在基于脉冲的通信方案以及低码重信道编码方法的基础之上。文献[24]进一步讨论 EMNN 中能量和频谱感知的 MAC 协议。文献[25]讨论在 Ad Hoc 纳米网络中不需要采用任何 MAC 协议,而是通过控制最大节点密度来保证通信可靠性。

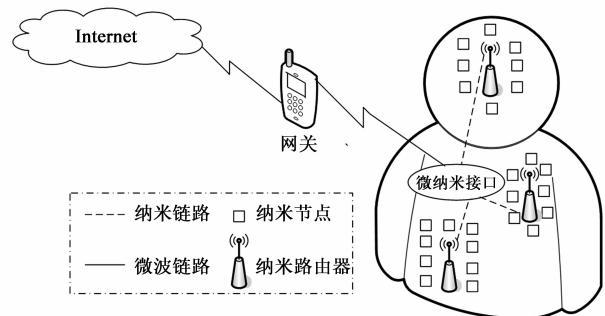


图2 健康监测系统的 WSN 网络架构^[3,4]

3 电磁纳米网的调制与低码重编码方法

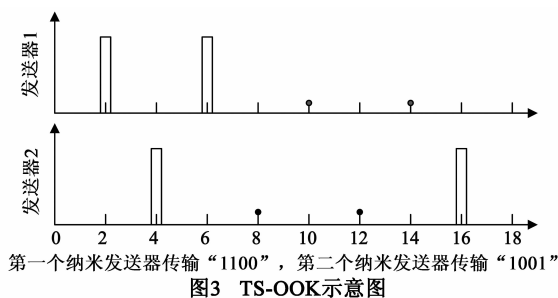
由于纳米传感器节点的尺寸及能量约束^[19],传统的基于传输连续信号的通信模式不适用于 WSN。在纳米规模,通过石墨烯延时线和纳米电容器的简单组合^[3]易于产生亚皮秒脉冲并有效辐射。传输超短脉冲(亚皮秒脉冲^[3]、飞秒脉冲^[13])是使用太赫兹频段信道

的有效方法^[13,26]. 目前, EMNN 一般采用基于开关键控调制(On-Off Keying, OOK)的调制方法^[9-11,19,23]. 在无线通信中使用基于 OOK 的优化编码方法是 Erin 等^[27]最早提出的. 使用基于 OOK 的调制及低码重编码^[9-12,19]方法,可以降低传输能耗,从而节省通信能耗.

3.1 基于 OOK 的调制方法

考虑在 EMNN 中传输二进制信息序列,采用 OOK 调制方法时,纳米传感器节点通过发送一个超短脉冲表示传输高位“1”,而以静默表示传输低位“0”.

TS-OOK(Time Spread On-Off Keying)是基于分时隙传输飞秒脉冲的开关键控调制,其实现方法^[28]是:纳米节点在传输高位“1”时发送一个飞秒脉冲,而在传输低位“0”时保持静默;固定每个位(比特)的传输时间间隔 T_s ,并使其值远远大于发送一个脉冲的持续时间(脉冲宽度) T_p ,即 $T_s \gg T_p$,例如, $T_p = 100(\text{fs})$, $T_s/T_p = 1000$. 图3是 TS-OOK 示意图,两个纳米发送器分别传输“1100”、“1001”,图中每个小矩形表示一个飞秒脉冲,每个小圆点表示一次静默. 使用 TS-OOK,若干纳米节点可以共用同一个信道;在传输时间间隔内,接收节点可以保持空闲状态,或者接收来自其他发送节点的信息,或者发送其本身的数据^[19],从而实现简单的多址访问控制. 但是, WNSN 中纳米节点附近有大量的邻居节点,如果它们采取非合作行为,在任意时刻开始传输信号,则产生碰撞是不可避免的^[19]. 文献[19]建立了接收端的干扰统计模型用于定量评估碰撞对 WNSN 的影响. 采用 TS-OOK,收发端之间必须进行严格的时间同步^[8,17],文献[17]讨论了包含时间同步模块的接收器架构.



区分传输符号率的分时隙开关键控 RD TS-OOK(Rate Division Time Spread On-Off Keying)^[23]是改进的 TS-OOK 调制方法. RD TS-OOK 在 TS-OOK 的基础上要求对于不同的纳米节点、不同类型的数据包传输时间间隔 T_s 和传输符号率 $\beta = T_s/T_p$ 都不同. RD TS-OOK 能够避免灾难性碰撞,使邻居纳米节点达到使用正交信道的效果. 使用 RD TS-OOK,减少了传输错误,在大多数情况下,低码重信道编码结合简单重复码就足以保证接收端正确地解码所接收的信息^[23].

3.2 节省传输能耗的低码重编码方法

一般而言,信源编码通过减小编码的冗余信息来提高符号的平均信息量;而信道编码通过增加编码的冗余信息来保证通信的可靠性. 针对二进制信息序列,电磁纳米网常用的编码方法将较短的/源字(Source word)匹配为较长的码字(Codeword),从而减少需要传输的高位“1”的数量. 这种编码方法增加了冗余比特,通常被称为一种信道编码. 表1是长度为2的源字和长度为3的码字匹配表,其中,码字的码重指的是码字中“1”的数量.

表1 源字-码字匹配表

源字	码字	码字的码重
00	000	0
01	001	1
10	010	1
11	100	1

纳米传感器节点的能量非常有限,节省能耗是 EMNN 编码方法必须考虑的一个重要因素. 目前,基于石墨烯的纳米电子学能耗依然是未知数^[23],已有文献一般暂不考虑发送端电路等能耗^[9],重点讨论的是通信能耗中的传输能耗. 目前,EMNN 低码重编码方法通过减小码字集合(码本)的平均码重(Average Codeword Weight, ACW),减少所要传输的高位数量,从而节省传输能耗. 如表1所示,编码前后的 ACW 分别为1和0.75. 使用低码重编码时,通过合理选择码重^[19]或者满足码距^[10]约束条件等措施,可以保障通信的可靠性.

纳米传感器节点的传输能耗等于传输一个高位的单位能耗与平均码重的乘积,因此节省传输能耗的编码方法一般考虑最小化 ACW 以节省传输能耗. 假设码长为 n , w_i 表示码本中第 i 个码字的码重;源字长度为 m ,则可能的源字共有 $M = 2^m$ 个.

在考虑源字等概率出现的情况下,ACW 用 W_{\min} 表示,按式(1)计算:

$$W_{\min} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M w_i \quad (1)$$

考虑源字非等概率出现的情况,最小化 ACW 需要把出现概率大的源字匹配为码重小的码字,若用 p_i 表示匹配给第 i 个码字的源字的出现概率,则最小化的 ACW 按式(2)计算:

$$W_{\min} = \sum_{i=1}^M w_i \cdot p_i, \quad (2)$$

$$\text{s. t. } w_1 \leq w_2 \leq \dots \leq w_M, \\ p_1 \geq p_2 \geq \dots \geq p_M$$

Jornet 等^[19]采用 TS-OOK 调制方法,在电磁纳米网

络中采用低码重信道编码(Low-Weight channel Coding, LWC)来降低共同使用信道的纳米节点之间的干扰.文献[12]表明,通过控制 LWC 的码重,可以降低 EMNN 的分子吸收噪声和多用户干扰,从而降低误码率,保障通信的可靠性,而且不会降低可用信息率.其实,LWC 通过使用低码重,也能达到节省传输能耗的效果;通过降低误码率,可以减少码字重传所产生的能耗.文献[12]、[19]所采用的码字具有相同的码重,即码重为某个常量 u ,在源字等概率出现的情况下,ACW 即为 u .设码长 $n=42$,码字的高位传输概率 $p_1 = u/n = 0.3$,则可以得到常量码重 $u = \lfloor n \cdot p_1 \rfloor = 12$.根据文献[12]、[19],在码长为 n 的码字集合中选择码重为 u 的不同码字来匹配长度为 m 的 2^m 个源字,共有式(3)所示的种数,并且满足式(4):

$$W(n, u) = \frac{n!}{(n-u)! u!} \quad (3)$$

$$W(n, u) \geq 2^m \quad (4)$$

Kocaoglu 等^[10]所提的最小能耗编码(Minimum Energy Coding, MEC),通过最小化平均码重以最小化平均传输能耗,同时使编码满足汉明码距约束来保证通信的可靠性.若编码的码距为 d ,则能够纠错 $\lfloor (d-1)/2 \rfloor$ 位,随着码距增大,可靠性增高^[10].设 $M(\leq 2^m)$ 个源字的出现概率为 $p_i (1 \leq i \leq M)$,其中最大出现概率为 p_{\max} .根据文献[10],对于给定的码距 d ,最小化的 ACW 按式(5)计算:

$$W_{\min} = \begin{cases} (1-p_{\max})d, & p_{\max} > 1/2, \\ d/2, & p_{\max} < 1/2, \quad d \text{ even}, \\ \lceil d/2 \rceil - p_{\max}, & p_{\max} < 1/2, \quad d \text{ odd} \end{cases} \quad (5)$$

对于给定的码距 d 和最大码重 k ,若满足 $\lceil d/2 \rceil k < d$,则最小化的 ACW 按式(6)计算:

$$W_{\min} = \begin{cases} (d-2k)p_{\max} + k, & p_{\max} > 1/2, \\ d/2, & p_{\max} < 1/2, \quad d \text{ even}, \\ \lceil d/2 \rceil - p_{\max}, & p_{\max} < 1/2, \quad d \text{ odd} \end{cases} \quad (6)$$

MEC 通过满足汉明码距来保障通信可靠性,通过保持较大的码距,在满足源字个数小于误符号率(symbol error probability)的倒数时,MEC 能完全无误地解码^[10].文献[10]的仿真结果表明,MEC 优于 Hamming 码、Reed-Solomon 码、Golay 码等分组码.

Chi 等^[9]考虑到平均码重的降低不一定就能相应地降低每比特的平均能耗(Energy consumption Per data Bit, EPB),引入码长及码率等约束条件,讨论最小传输能耗(Minimum Transmission Energy, MTE)编码,通过建立优化问题最小化 EPB.其实,对于给定的源字长度, MTE 编码可以仅考虑通过最小化 ACW 来最小化传输能耗.设 C_n^i 表示在码长为 n 的码字集合中取含有 i 个高

位的码字的种数,按文献[9]的方法所确定的码字最大码重 w_{\max} 如式(7)所示:

$$w_{\max} = \min \{j: C_n^0 + C_n^1 + \dots + C_n^j \geq M\} \quad (7)$$

构建优化码本时,在码重取值范围为 $[0, w_{\max}]$ 的码字集合中按码重从小到大选择前 M 个码字.源字长度为 m ,在源字等概率出现的情况下,设传输每个高位的能耗为 E_p ,根据文献[9],优化码本的最小化 ACW 按式(8)计算,而 EPB 按式(9)计算:

$$W_{\min} = \left(\sum_{i=0}^{w_{\max}-1} i \cdot C_n^i + w_{\max} \left(M - \sum_{i=0}^{w_{\max}-1} C_n^i \right) \right) / M \quad (8)$$

$$E_b = \frac{E_p}{M \cdot m} \left(\sum_{i=0}^{w_{\max}-1} i \cdot C_n^i + w_{\max} \left(M - \sum_{i=0}^{w_{\max}-1} C_n^i \right) \right) \quad (9)$$

根据文献[9],MTE 编码在中低误比特率(≤ 0.01)的场景下 EPB 低于 MEC,而在高误比特率场景下 MTE 编码的 EPB 高于 MEC,因为 MEC 中需要相对较大的 ACW 来保证通信的可靠性;而 MTE 的平均码字重传次数会随着误比特率增大而增大,从而导致 EPB 增大.因此,MTE 编码适用于在中低误码率的场景下节省传输能耗.

根据码长是否固定,可以把编码分为定长编码和变长编码,如前所述都是定长编码.最近,Chi 等^[11]基于 OOK 调制技术,首次提出在 WSN 中使用变长编码来保证能量有效性.前缀编码(Prefix-Free Codes, PFC)^[11]的码本中,任意码字都不是其他任何码字的前缀. PFC 在满足平均码长(Average Codeword Length, ACL)的约束下,通过最小 ACW 以最小化传输能耗,且保证吞吐量大于预设阈值.优越最低码重(Superior Lowest-Weight, SLW)编码^[11]是 ACW 和 ACL 都取最小值的变长前缀编码.设长度为 m 的 $M=2^m$ 个源字等概率出现,

则唯一的 SLW 编码为 $\{1, 01, 001, \dots, \overbrace{0 \dots 0}^{M-2} 01, \overbrace{0 \dots 0}^{M-1}\}$,其 ACW 为 $(M-1)/M$, ACL 为 $(M^2 + M - 2)/(2 \cdot M)$.对于给定的源字长度 m 和 ACL 阈值,设计优化的 PFC 以最小化传输能耗是一个较复杂的整数非线性程序设计问题^[11],不易找到精确解.文献[11]采用启发式算法 BT-WD(Binary Tree based Weight Decreasing algorithm)和 BT-LD(Binary Tree based Length Decreasing algorithm)构建节能的低码重编码.

根据文献[11],PFC 编码在中低误比特率(≤ 0.01)的场景下传输能耗低于 MEC,这是因为 MEC 为了保证纠错能力而导致相对更大的 ACW;在中低误码率的场景中,PFC 编码方法较之定长的低码重编码方法,传输能耗更小且吞吐量更易于控制;在 ACL 阈值 Γ 满足 $m < \Gamma < 2^m - 1$ 的条件下,PFC 编码较之定长编码,每码字平均能耗更小.

表 2 所示是 LWC、MEC、MTE、PFC 等编码方法的比

较情况.

表 2 编码方法对比

编码方法	节能	可靠性	编码复杂性	适用场景
LWC	较少	较高	较低	较高误码率
MEC	中等	高	较高	较高误码率
MTE	较多	较低	中等	中低误码率
PFC	较多	较低	高	中低误码率

4 电磁纳米网节能编码研究展望

电磁纳米网是一种新的网络架构,许多理论与技术问题亟待研究.在电磁纳米网节能编码方面,需要进一步研究的主要方向如下:

(1) 电磁纳米网编码理论与方法的完善

在完善太赫兹信道建模理论的基础上,进一步完善 EMNN 编码理论,建立认可度高的、低复杂性的信道编码方案,将为编码方法和算法的进一步研究与实际应用奠定理论基础.在文献[9,10,12,19]等定长编码和文献[11]的变长编码的研究基础之上,进一步深入研究各种不同的编码方法,将促进电磁纳米网编码方法的不断趋于完善.研究 EMNN 编码理论与方法,既要考虑源字等概率出现的场景,又要考虑随机概率分布等非等概率的场景.另外,在 EMNN 中如何借鉴基于分子通信方式的纳米网络、无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)、网络编码(Network Coding, NC)等相关的编码研究成果,也是亟待研究的.

(2) 更全面的能耗模型

已有的 EMNN 低码重编码方法相关文献中一般仅考虑通信能耗中的传输能耗.其实,对于太赫兹短距通信,接收能耗也是不可忽视的^[7].在 EMNN 中,节省通信能耗的编码方法需要结合纳米节点密集部署导致的多用户干扰影响和太赫兹通信的特性,例如路径损耗、分子吸收噪声等,综合考虑传输能耗与接收能耗.设传输能耗表示为 E_{tx} ,接收能耗表示为 E_{rx} ,则通信能耗 E_{com} 可用式(10)表示:

$$E_{com} = E_{tx} + E_{rx} \quad (10)$$

传输能耗主要由码重决定,而接收能耗与码长密切相关,通信能耗模型需要综合考虑码重与码长对通信能耗的影响.在更全面的通信能耗模型中,编码和解码产生的能耗及纳米收发器的电路能耗等其他能耗也应该加以考虑.更全面的能耗模型还需要考虑传感、处理等其他方面的能耗.另外,由于路径损耗、分子吸收噪声、多用户干扰等影响,太赫兹信道的误比特率(Bit Error Rate, BER)较高,从而误码率(Codeword Error Rate, CER)也较高,能耗模型中应考虑为了保证正确接收码字而进行码字重传所产生的能耗.

(3) 节能高效的编码算法

EMNN 中的纳米传感器节点由于尺寸及当前技术所限,所能存储的能量极其有限,所用的编码算法必须是节能高效的.如何设计并实现算法高效地产生低码重编码是亟待研究的问题.对于源字长度为 m ,源字数为 $M=2^m$ 的情况,文献[11]所提的启发式编码算法中,BT-WD算法的时间复杂度为 $O(M^3 \log_2 M)$,BT-LD算法的时间复杂度为 $O(M^4)$,较适用于源字长度很小的场景,对于较大的码字长度,一般需要离线使用.在 EMNN 中,对于计算、存储能力都极低的纳米节点而言,时间复杂度较低(例如 $O(M)$ 、 $O(M \log_2 M)$ 、 $O(M^2)$)的编码算法既可以减少运行时间,节约纳米传感器节点的计算资源,又可以高效地产生低码重编码,节省纳米传感器节点的处理、通信等能耗;空间复杂度较低(例如 $O(M)$)的编码算法可以节约纳米节点有限的存储资源.另外,与编码算法对应的解码算法也应该具有较低的时间复杂度和空间复杂度.

(4) 权衡网络性能的节能编码优化

EMNN 编码方法与算法既要具有能量有效性,又要兼顾通信可靠性、时延、吞吐率等网络性能.采用减小码重的方法^[12],能降低 EMNN 中的分子吸收噪声和多用户干扰,从而降低误码率,使通信可靠性得到保证,因此需要优化确定码重.MEC 通过保证汉明码距^[10]约束来保障通信可靠性,但导致码长过大.大的码长可以减小 ACW,从而减小传输能耗,但将导致大的接收能耗和时延,使得吞吐率降低,也可能产生较大的误码率,因此需要优化码长.编码优化可以从点到点通信、端到端通信和整个 EMNN 等不同角度进行研究.

(5) 电磁纳米网编码的实际应用

当前,EMNN 编码尚处于理论研究阶段,编码与实际应用之间还存在很大的距离.由于纳米传感器的尺寸和能量限制,实用的 EMNN 编码和解码方法应该具有低复杂性;实用的编码和解码算法应该具有易于集成到纳米收发器、纳米编/解码器等纳米器件中.针对不同的应用领域,根据不同的网络条件和性能需求,对于源字长度、码长、码重、数据包大小等参数,既要在编码设计阶段合理地优化,又要考虑在编码算法运行时能自适应动态调整.

5 总结

本文在概述无线纳米传感器网络的基础上,从基于 OOK 的调制技术和节省传输能耗的低码重编码方法这两方面综述电磁纳米网(EMNN)中节能编码方法的研究进展,展望 EMNN 的研究方向.目前,电磁纳米网的编码方法主要包括低码重信道编码(LWC)、最小能耗编码(MEC)、最小传输能耗(MTE)编码及前缀编码

(PFC)等,其中,LWC、MEC、MTE 编码属于定长编码,码长是定值,而 PFC 编码是码长可变的变长编码,这些编码通过最小化平均码重(ACW)以最小化传输能耗. EMNN 节能编码方法的进一步研究,需要完善编码理论和方法,需要紧密结合太赫兹通信特性,综合考虑传输能耗与接收能耗等各方面能耗建立全面的能耗模型,需要设计低复杂性的编码方法和节能高效的编码算法,需要在编码节能优化的同时兼顾通信可靠性等其他网络性能,需要考虑编码方法和算法的实用性. 电磁纳米网编码从理论到实际应用都亟待研究,这些研究的深入将极大地推动和促进 EMNN 节能编码方法不断趋向成熟与完善. 无线纳米传感器网络是当前国际研究前沿课题之一,国内已有一些高校、研究机构及研究人员在进行相关研究,但当前尚鲜见无线纳米传感器网络的中文文献,希望本文能够促进国内对无线纳米传感器网络的进一步关注和研究.

参考文献

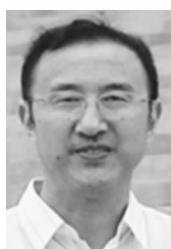
- [1] Jornet J M, Akyildiz I F. Channel capacity of electromagnetic nanonetworks in the terahertz band [A]. 2010 IEEE International Conference on Communications (ICC) [C]. Cape Town: IEEE Press, 2010. 1 - 6.
- [2] Akyildiz I F, Brunetti F, Blázquez C. Nanonetworks: A new communication paradigm [J]. Computer Networks, 2008, 52 (12): 2260 - 2279.
- [3] Akyildiz I F, Jornet J M. Electromagnetic wireless nanosensor networks [J]. Nano Communication Networks, 2010, 1 (1): 3 - 19.
- [4] Akyildiz I F, Jornet J M. The internet of nano - things [J]. Wireless Communications, 2010, 17 (6): 58 - 63.
- [5] 谢维信, 裴继红. THz 信号处理与分析的研究现状和发展展望 [J]. 电子学报, 2007, 35 (10): 1973 - 1979.
XIE Wei-xin, PEI Ji-hong. Review of terahertz signal processing and analysis [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35 (10): 1973 - 1979. (in Chinese)
- [6] 姚建铨, 迟楠, 杨鹏飞, 等. 太赫兹通信技术的研究与展望 [J]. 中国激光, 2009, 36 (09): 2213 - 2233.
YAO Jian-quan, CHI Nan, YANG Peng-fei, et al. Study and outlook of terahertz communication technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36 (09): 2213 - 2233. (in Chinese)
- [7] Akyildiz I F, Jornet J M, Han C. Terahertz band: Next frontier for wireless communications [J]. Physical Communication, 2014, 12: 16 - 32.
- [8] Jornet J M, Akyildiz I F. Joint energy harvesting and communication analysis for perpetual wireless nanosensor networks in the terahertz band [J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2012, 11 (3): 570 - 580.
- [9] Chi K, Zhu Y -h, Jiang X, et al. Optimal coding for transmission energy minimization in wireless nanosensor networks [J]. Nano Communication Networks, 2013, 4 (3): 120 - 130.
- [10] Kocaoglu M, Akan O B. Minimum energy channel codes for nanoscale wireless communications [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12 (4): 1492 - 1500.
- [11] Chi K, Zhu Y -h, Jiang X, et al. Energy-efficient prefix-free codes for wireless nano-sensor networks using OOK modulation [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13 (5): 2670 - 2682.
- [12] Jornet J M. Low-weight error-prevention codes for electromagnetic nanonetworks in the Terahertz Band [J]. Nano Communication Networks, 2014, 5 (1 - 2): 35 - 44.
- [13] Jornet J M, Akyildiz I F. Femtosecond-long pulse-based modulation for terahertz band communication in nanonetworks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62 (5): 1742 - 1754.
- [14] Jornet J M, Akyildiz I F. Graphene-based plasmonic nano-antenna for terahertz band communication in nanonetworks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31 (12): 685 - 694.
- [15] Wang Y, Wu Q, He X-J, et al. Terahertz radiation from armchair carbon nanotube dipole antenna [J]. Chinese Physics B, 2009, 18 (5): 1801 - 1806.
- [16] Jornet J, Akyildiz I. Graphene-based plasmonic nano-transceiver for terahertz band communication [A]. 2014 European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) [C]. The Hague: IEEE Press, 2014. 492 - 496.
- [17] Cid-Fuentes R G, Jornet J M, Akyildiz I F, et al. A receiver architecture for pulse-based electromagnetic nanonetworks in the terahertz band [A]. 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC) [C]. Ottawa, ON: IEEE Press, 2012. 4937 - 4942.
- [18] Jornet J M, Akyildiz I F. Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10 (10): 3211 - 3221.
- [19] Jornet J M, Akyildiz I F. Low-weight channel coding for interference mitigation in electromagnetic nanonetworks in the terahertz band [A]. 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC) [C]. Kyoto: IEEE Press, 2011. 1 - 6.
- [20] Piro G, Grieco L A, Boggia G, et al. Nano-Sim: simulating electromagnetic-based nanonetworks in the Network Simulator 3 [A]. Proceedings of the 6th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques [C]. Cannes, France: ICST, 2013. 203 - 210.

- [21] Piro G, Grieco L, Boggia G, et al. Simulating wireless nano sensor networks in the NS-3 platform [A]. Proc. of Workshop on Performance Analysis and Enhancement of Wireless Networks (PAEWN) [C]. Barcelona, Spain: IEEE Press, 2013. 67 – 74.
- [22] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, et al. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2009, 110(9):533 – 572.
- [23] Jornet J M, Capdevila Pujol J, Solé Pareta J. PHLAME: A physical layer aware MAC protocol for electromagnetic nanonetworks in the terahertz band [J]. Nano Communication Networks, 2012, 3(1):74 – 81.
- [24] Wang P, Jornet J M, Abbas Malik M G, et al. Energy and spectrum-aware MAC protocol for perpetual wireless nanosensor networks in the Terahertz Band [J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(8):2541 – 2555.
- [25] Kocaoglu M, Malak D. On the node density limits and rate-delay-energy tradeoffs in ad hoc nanonetworks with minimum energy coding [A]. 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC) [C]. Ottawa, ON: IEEE Press, 2012. 6157 – 6161.
- [26] Boronin P, Petrov V, Moltchanov D, et al. Capacity and throughput analysis of nanoscale machine communication through transparency windows in the terahertz band [J]. Nano Communication Networks, 2014, 5(3):72 – 82.
- [27] Erin C, Asada H H. Energy optimal codes for wireless communications [A]. 1999 Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control [C]. Phoenix, AZ: IEEE Press, 1999. 4446 – 4453.
- [28] Jornet J M, Akyildiz I F. Information capacity of pulse-based wireless nanosensor networks [A]. 2011 IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON) [C]. Salt Lake City, UT: IEEE Press, 2011. 80 – 88.

作者简介



黄龙军 男, 1976 年生于福建连城. 博士生, 讲师, 研究方向为无线纳米传感器网络、无线传感器网络和博弈论.
E-mail: hlj_jlh@163.com



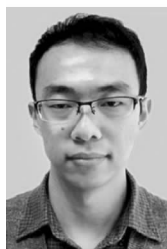
王万良 (通信作者) 男, 1957 年生于江苏高邮. 博士生导师, 教授, 研究方向为计算机智能、自动化和无线网络.
E-mail: ww1@zjut.edu.cn



姚信威 男, 1986 年生于浙江诸暨. 博士, 副教授, 研究方向为无线传感器网络和无线纳米传感器网络.
E-mail: xwyao@zjut.edu.cn



沈士根 男, 1974 年生于浙江桐乡. 博士, 教授, 研究方向为无线传感器网络和博弈论.
E-mail: shigens@126.com



潘小刚 男, 1990 年生于河南濮阳. 硕士生, 研究方向为无线传感器网络.
E-mail: pxg_zjut@hotmail.com