

# 无线纳米传感器网络最小化能耗编码方法

黄龙军<sup>1,2</sup>, 王万良<sup>1</sup>, 姚信威<sup>1</sup>

(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)

**摘 要:** 无线纳米传感器网络是当前纳米技术相关的研究热点之一. 纳米传感器可存储的能量极为有限, 能量有效性是无线纳米传感器网络中必须优先考虑的重要问题. 针对无线纳米传感器网络, 综合考虑传输能耗和接收能耗, 建立能耗模型; 提出通信能耗最小化编码(EMC)方法. 使用 EMC, 可以最小化传输能耗, 可以满足码字长度和码率约束要求, 可以确定最小化通信能耗的优化码长. 通过实验对比分析, EMC 方法在能耗方面具有较好的性能.

**关键词:** 无线纳米传感器网络; 通信能耗; 码长; 开关键控调制

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)11-2271-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.11.020

## Energy Minimization Coding for Wireless Nanosensor Networks

HUANG Long-jun<sup>1,2</sup>, WANG Wan-liang<sup>1</sup>, YAO Xin-wei<sup>1</sup>

(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)

**Abstract:** For the time being, wireless nanosensor networks(WNSNs) is a research focus of nanotechnology. Because the nanosensors' energy is extremely limited, the energy efficiency is an important issue in WNSNs. By jointly taking into account the energy consumption of transmission and reception, the energy consumption model and energy minimization coding (EMC) are proposed for WNSNs. In this way, the transmission energy minimization can be achieved, the codeword length and code rate constraints can be met, and the optimum codeword length for the communication energy minimization can be determined. Through comparative analysis, the energy efficiency of EMC is better.

**Key words:** wireless nanosensor networks; communication energy consumption; codeword length; on-off keying modulation

## 1 引言

随着纳米技术的发展,无线纳米传感器网络(Wireless NanoSensor Networks, WNSN)正成为当前学术界的研究热点. 简言之, WNSN 是由大量可相互通信的纳米传感器构成的网络. WNSN 的应用可以分为四类<sup>[1]</sup>: 生物医学应用(如健康监测系统、药物输送系统等)、环境应用(如植物监控系统、灾害防御系统等)、工业应用(如互联办公室等)及军事应用(如核生化防御等). 纳米传感器是纳米技术最早的应用之一<sup>[1]</sup>, 其纳米元件不仅仅是尺寸在纳米级, 而且要利用纳米材料(如石墨烯、碳纳米管、石墨烯纳米带等)的特性来完成感知、处理、数据存储、执行等简单任务. 通过纳米传感器之间的协作和信息共享<sup>[2]</sup>, 可以扩展单个纳米传感器的能力, 在更大的距离范围内完成更复杂的任务. 由于纳米传感器的尺寸

在纳米级, 可存储的能量极其有限, 传统的通信方式不适用于 WNSN<sup>[3]</sup>. 纳米传感器之间的通信方式主要有两种<sup>[1,2]</sup>: 分子通信和纳米电磁通信. 分子通信传输与接收的是以分子为载体的信息; 纳米电磁通信(太赫兹通信)则以太赫兹(Terahertz, THz)频段<sup>[1]</sup>(0.1 - 10THz)的电磁波为信息载体. 使用纳米天线及相应的纳米收发器可以实现太赫兹通信; 文献[4]表明碳纳米管(CNTs)天线可以发射的电磁波功率可以达到  $5\mu\text{W}$ ; 文献[5]所设计的基于石墨烯的纳米天线长为  $1\mu\text{m}$ , 宽为  $10 - 100\text{nm}$ , 该天线由石墨烯纳米带(GNRs)构成, 工作频率在太赫兹频段, 是实现纳米网络电磁通信的关键要素之一; 文献[6]所提出的基于石墨烯的电浆纳米收发器适用于太赫兹频段的通信.

WNSN 的主要挑战之一是纳米传感器节点极其有限的能量储存能力<sup>[7]</sup>. 纳米传感器在感知、数据存储、

计算、通信等各方面都会耗能,纳米传感器工作在 THz 频段,能量主要消耗在通信方面<sup>[7]</sup>.近期的 WNSN 相关文献<sup>[8,9]</sup>研究通信方面的传输能耗,而未考虑接收能耗.本文基于开关键控(On-Off Keying, OOK<sup>[8~13]</sup>)调制技术,讨论在 WNSN 中采用纳米电磁通信方式,综合考虑传输能耗与接收能耗,建立通信能耗模型;所提的通信能耗最小化编码(Energy Minimization Coding, EMC)方法,把源字匹配为一一对应的码字,在确定最大码重的基础上,构建出优化码本并进行优化编码,从而最小化平均码重(Average Codeword Weight, ACW)以最小化传输能耗;在满足码字的长度约束以及码率(源字长度  $m$  与码字长度  $n$  的比,即  $m/n$ )约束的条件下最小化通信能耗;考虑到码长对于能量有效性的影响,通过建立并求解优化问题,确定出最小化能耗的优化码长,能满足较高的码率性能要求.

## 2 WNSN 的通信能耗模型

目前,WNSN 纳米电磁通信采用的一般都是基于 OOK 的调制技术.OOK 是一种基于脉冲的简单调制技术;基于 OOK 的编码复杂性低,而且可以有效地降低传输能耗<sup>[11]</sup>.本文讨论的太赫兹信道 OOK 编码的通信过程为:(1)发送端先对源字进行编码得到码字,再使用 OOK 调制发送;(2)接收端进行 OOK 解调并解码.这两个步骤中,编码、调制、解调、解码都会产生能耗.在太赫兹通信中,由于分子吸收产生路径损耗、噪声及多用户干扰等原因,单个纳米节点的有效传输距离极短(远小于 1m).在太赫兹短距通信中,除了传输能耗,解码能耗也是不容忽视的<sup>[14]</sup>.太赫兹通信的编码、解码的能耗与纳米规模的编码器、解码器和收发器<sup>[6]</sup>等硬件的设计密切相关,而目前集成的纳米传感器尚未开发出来<sup>[7]</sup>,还不能通过实验来测量纳米传感器的能耗变化情况;当前的相关研究重点关注架构的提出、模型的建立及分析等方面,本文暂不考虑编码/解码所产生的能耗.

WNSN 的太赫兹通信能耗主要包括发送端能耗和接收端能耗<sup>[7]</sup>,自供能纳米节点可用于实现永久的 WNSN.已有的 WNSN 编码相关的文献<sup>[8,9,13]</sup>,能量有效性方面主要讨论的是通过减小 ACW 以节省传输能耗,并未考虑接收能耗.低码重信道编码<sup>[13]</sup>可以减轻 WNSN 中的纳米节点之间的干扰,同时可以节省传输能耗.Kocaoglu 等<sup>[9]</sup>所提的最小能量编码(Minimum Energy Codes, MEC)方法,通过最小化 ACW 以最小化平均传输能耗.Chi 等<sup>[8]</sup>所提的最小化传输能耗(Minimum Transmission Energy, MTE)编码方法,研究最小化每个数据位(比特)的平均传输能耗.本文讨论在 WNSN 中综合考虑传输能耗与接收能耗,建立通信能耗模型,从发送端/接收端的平均能耗的角度,重点讨论 WNSN 的通信能

耗.

设发送端平均能耗(传输能耗)表示为  $E_{tx}$ ,接收端平均能耗(接收能耗)表示为  $E_{rx}$ ,则总的平均能耗(总能耗)  $E_{total}$  可以用式(1)表示:

$$E_{total} = E_{tx} + E_{rx} \quad (1)$$

在对二进码进行 OOK 调制时,传输高位“1”通过发送一个飞秒脉冲表示,需要耗费一定的能量,设为  $E_{tp}$ ,则传输能耗表示为单个脉冲能耗与优化码本的平均码重  $W_{avg}$  的乘积;而传输低位“0”以静默表示,不需要耗费能量;接收时,不论高位还是低位都要能耗,即每个位的接收都要耗费能量<sup>[7]</sup>,设为  $E_{rb}$ .假设所传输的每个码字的长度为  $n$ ,则编码后需要传输及接收的平均数据位数即为  $n$ .综上所述,可得式(2)和式(3):

$$E_{tx} = E_{tp} \times W_{avg} \quad (2)$$

其中,式(2)中的平均码重  $W_{avg}$  按下文中的式(8)或(10)进行计算.

$$E_{rx} = n \times E_{rb} \quad (3)$$

综合式(1)、(2)、(3),可得式(4):

$$E_{total} = E_{tp} \times W_{avg} + n \times E_{rb} \quad (4)$$

本文认为发送每个脉冲的能耗  $E_{tp}$  是某个固定值(例如 1pJ),根据 Jornet 等<sup>[7]</sup>的研究,  $E_{rb}$  的值约为  $E_{tp}$  的 10%,本文设收发能耗比  $\beta = E_{rb}/E_{tp}$ ,满足  $0 < \beta \leq 0.1$ .由此,式(4)可以写为式(5):

$$E_{total} = E_{tp} (W_{avg} + \beta \times n) \quad (5)$$

由式(5)可知,在给定发送每个脉冲的能耗  $E_{tp}$  和收发能耗比  $\beta$  的情况下,总能耗  $E_{total}$  由平均码重  $W_{avg}$  及码字长度  $n$  确定.

## 3 WNSN 通信能耗最小化编码方法

在 WNSN 中,低码重编码<sup>[13]</sup>和 MEC<sup>[9]</sup>等都是信道编码,超低复杂性的信道编码方法依然是太赫兹信道编码的研究挑战<sup>[14]</sup>;对于能量受限的无线纳米传感器节点而言,在极短的传输距离内,如何进行编码和调制以优化传输能耗及接收能耗的问题,也是亟待研究的.本文讨论的 EMC 方法基于 Erin 等<sup>[10]</sup>最先提出的最小能量(Minimum Energy, ME)编码.ME 编码<sup>[10]</sup>用于无线传感器网络中,是一种通过把源字匹配为码字来减少所传输信息中的高位(即“1”)数量的编码技术,包括码本优化和编码优化这两方面.ME 编码<sup>[10]</sup>的基本思想是在一个给定的可选码字集合中选择码重最小的前面若干个码字构成码本且与源字一一对应匹配;匹配时,把出现概率高的源字匹配为码重小的码字.

### 3.1 最小化传输能耗的编码方法

在给定源字长度  $m$  和码字长度  $n$  时,EMC 方法的编码过程为:先求出所用码字的最大码重  $w_{max}$ ;再按码

重从 0 到  $w_{\max}$  构建符合 ME 编码思想的优化码本;最后进行最小化 ACW 编码,从而最小化传输能耗.简言之,EMC 编码过程:确定最大码重  $w_{\max}$  → 构建优化码本 → 最小化 ACW 编码.

最大码重  $w_{\max}$  采用文献[8]所用的方法确定,如式(6)所示:

$$w_{\max} = \min \{ j: C_n^0 + C_n^1 + \dots + C_n^j - K \geq 0 \} \quad (6)$$

其中,  $K$  为源字个数,  $n$  为码字长度;组合数  $C_n^i = \frac{n!}{(n-i)! i!}$ ,表示在码长为  $n$  的码字集合中选取码重为  $i$  的码字的种数<sup>[13]</sup>;最大码重  $w_{\max}$  指的是满足条件  $C_n^0 + C_n^1 + \dots + C_n^j - K \geq 0$  的最小  $j$  值.例如,  $K = 8, m = 3, n = 4$  时,可按式(6)计算出最大码重  $w_{\max}$  等于 2,优化码本(不唯一)如表 1 的第二列所示.

表 1 源字-码字匹配表 ( $m = 3$ )

源字	码字(4位)	码字(5位)	码字(6位)	码字(7位)
000	0000	00000	000000	0000000
001	0001	00001	000001	0000001
010	0010	00010	000010	0000010
011	0100	00100	000100	0000100
100	1000	01000	001000	0001000
101	0101	10000	010000	0010000
110	0011	00011	100000	0100000
111	0110	00110	000011	1000000

构建优化码本时,初始码本为空集,当码本中的码字个数还没有达到  $K$  时,依次按码重从小到大的顺序,把码重在闭区间  $[0, w_{\max} - 1]$  范围内的所有码字(共  $\sum_{i=0}^{w_{\max}-1} C_n^i$  个)全都加入码本中,然后再把剩余的  $K - \sum_{i=0}^{w_{\max}-1} C_n^i$  个码重为  $w_{\max}$  的码字加入码本中.所构建的优化码本如式(7)所示:

$$C = \{ C_0, C_1, \dots, C_i, \dots, C_{K-1} \} \quad (7)$$

$$\text{s.t. } w_0 << w_1 \leq \dots \leq w_i \leq \dots \leq w_{K-1}$$

其中,  $w_i (0 \leq i \leq K-1)$  为码字  $C_i$  的码重,而且取值范围为  $[0, w_{\max}]$ .

最小化 ACW 编码过程分为两步:首先把源字的出现概率  $p_i (0 \leq i \leq K-1)$  按非递增序排列,然后把已按码重  $w_i$  非递减序排列的码字  $C_i$  与概率为  $p_i$  的源字相匹配.此时,平均码重  $W_{\text{avg}}$  按式(8)进行计算:

$$W_{\text{avg}} = \sum_{i=0}^{K-1} w_i \times p_i \quad (8)$$

例如,如表 2 所示,当  $K = 8, m = 3, n = 5$  时,可得  $W_{\text{avg}} = 0.97$ .把式(8)代入式(5)中,可得式(9):

$$E_{\text{total}} = E_{\text{tp}} \left( \sum_{i=0}^{K-1} w_i \times p_i + \beta \times n \right) \quad (9)$$

可以直接按式(9)计算总能耗  $E_{\text{total}}$ ,也可以在计算得到了码本的平均码重  $W_{\text{avg}}$  之后,根据式(5)计算  $E_{\text{total}}$ .

结合编码过程,简单分析 EMC 编码的时间复杂度如下:设组合数的计算为基本操作,采用简单穷举法求解  $w_{\max}$  的时间复杂度可用  $O(n)$  衡量;码本构建时,按码重取值范围  $[0, w_{\max}]$  产生  $K$  个码字并依序存储在优化码本中,算法的时间复杂度是线性的;最小化 ACW 编码时,对源字按其出现概率排序的时间复杂度取决于所用的排序算法,而把源字匹配为码字的时间复杂度是线性的;故 EMC 编码的时间复杂度可以采用排序算法的时间复杂度来衡量,通常为  $O(K^2)$  或  $O(K \log_2 K)$ .通过建立源字与码字的一一对应关系,解码操作是把接收到的码字一一匹配为对应的源字,其时间复杂度为  $O(K)$ .WNSN 中纳米传感器的尺寸、能量都极为受限,所用的编码和解码方法应该具有低复杂性、节能、高效等特点.另外,集成的纳米传感器<sup>[1]</sup>包括传感模块、执行模块、能量模块、处理模块、存储模块、通信模块,可以考虑在处理模块中进行编码、解码操作,进一步降低通信能耗.

### 3.2 考虑不同码长的通信能耗最小化

Prakash 等<sup>[11]</sup>基于 ME 编码,把长度为  $m$  的源字编码为长度为  $2^m - 1$  的码字,除了一个全 0 码字外,每个码字都只有一个高位,这种编码在本文中称为常一编码,码率为  $m/(2^m - 1)$ ,当  $m$  较大时,码字长度很大,码率变得非常小.ME 编码<sup>[10]</sup>、常一编码<sup>[11]</sup>和 MEC<sup>[9]</sup>等编码方法并没有考虑不同码长对能量有效性的影响.这些编码方法减少了需要传输的高位,从而节省了传输能耗;但是,由于接收增长的码字导致接收端需要耗费更多的接收能量,在传输距离极短的情况下,总能耗可能并不会减少,因此,EMC 必须考虑码长对最小化能耗的影响.对于给定的源字长度  $m$ ,在要求满足最长码长  $N$ 、最小码率  $\rho$  的约束时,码长  $n$  的取值应满足条件  $n = \min \{ K - 1, N, \lfloor m/\rho \rfloor \}$ ;其中,  $\lfloor x \rfloor$  表示下取整,即取不大于  $x$  的最大整数.

根据所对应码字的码重,源字的出现概率可以采用另一种表示形式.源字共有  $K$  个,码长为  $n$  的一一对应的码字也有  $K$  个,把码重相同的码字作为同一类码字,记码重为  $i$  的第  $j$  个码字所对应的源字的出现概率为  $q_{ij}$ ;当码重小于  $w_{\max}$  时,优化码本中码重为  $i$  的码字有  $C_n^i$  个;而码重等于  $w_{\max}$  的码字有  $K - \sum_{i=0}^{w_{\max}-1} C_n^i$  个;平均码重  $W_{\text{avg}}$  可按式(10)计算:

$$W_{\text{avg}} = \sum_{i=0}^{w_{\max}-1} \sum_{j=1}^{C_n^i} q_{ij} \times i + \sum_{j=1}^{K - \sum_{i=0}^{w_{\max}-1} C_n^i} q_{w_{\max}j} \times w_{\max} \quad (10)$$

其中,  $q_{ij} \geq q_{i+1j} \geq q_{w_{\max}j}$ ,  $q_{ij} \geq q_{ij+1}$  (当  $0 \leq i < w_{\max}$  时,  $1 \leq j$

$< C_n^i$ ; 当  $i = w_{\max}$  时,  $1 \leq j < K - \sum_{i=0}^{w_{\max}-1} C_n^i$ , 满足把出现概率高的源字编码为码重小的码字的要求. 若源字等概率出现, 即  $q_{ij} = q_{i+1j} = 1/K (0 \leq i < w_{\max})$ , 则式(10)可以简化为式(11):

$$W_{avg} = \left[ \sum_{i=0}^{w_{\max}-1} i \times C_n^i + w_{\max} (K - \sum_{i=0}^{w_{\max}-1} C_n^i) \right] / K \quad (11)$$

在 WSN 中采用 EMC 编码方法, 编码后较小的码重可以节省传输能耗并保证一定的通信可靠性. 但是, 编码后太大的码长将导致接收能耗过大, 码长与通信能耗直接相关, 所以必须考虑码字长度的优化. 针对 EMC 编码方法, 下面讨论在给定源字长度  $m$  (此时最多有  $2^m$  个源字) 和源字个数  $K \leq 2^m$  的情况下, 优化总能耗  $E_{total}$ . 使用 EMC 编码方法, 码字长度  $n \geq$  源字长度  $m$ ; 当  $n = K - 1$  时, 若采用常一编码方法, 则优化码本中除了一个码重为 0 的码字之外, 其余码字的码重都为 1, 此时的 ACW 最小, 从而传输能耗最小; 而当  $n > K - 1$  时, 可以采用常一编码的方法保持传输能耗不变, 但接收能耗随  $n$  增大而增大, 从而总能耗不断增大. 因此, 在优化总能耗时可以限制  $n$  的最大取值为  $K - 1$ , 则  $n$  的取值范围为  $[m, 2^m - 1]$ . 基于以上分析, 考虑源字等概率出现, 最小化总能耗的优化问题如下所示:

$$\min_{n, w_{\max}} E_{tp} \times \left\{ \beta \times n + \left[ \sum_{i=0}^{w_{\max}-1} i \times C_n^i + w_{\max} (K - \sum_{i=0}^{w_{\max}-1} C_n^i) \right] / K \right\},$$

$$\text{s.t. } n \in \{m, m+1, \dots, 2^m - 1\},$$

$$w_{\max} = \min \{j: C_n^0 + C_n^1 + \dots + C_n^j - K \geq 0\}$$

采用穷举法求解此优化问题, 可以得到最小化的总能耗及相应的最小的码字长度  $n$  和最大码重  $w_{\max}$ .

## 4 不同编码方法的能耗性能分析

在这里, 假设传输一个飞秒脉冲的能耗  $E_{tp}$  为 1 个单位能耗 (例如, 1pJ); 接收每个数据位的能耗  $E_{rb} = 0.1 E_{tp}$ , 即取收发能耗比  $\beta = 0.1$ . 由于所比较数据的参考文献<sup>[9-11]</sup>并不涉及接收耗能, 为了比较的一致性, 总能耗的计算统一采用我们所提的能耗模型.

表 2 EMC 编码

源字	概率	码字(5位)	码重
000	0.20	00000	0
001	0.16	00001	1
010	0.15	00010	1
011	0.12	00100	1
100	0.11	01000	1
101	0.09	10000	1
110	0.09	00011	2
111	0.08	00110	2

在表 2 中, 长度  $m = 3$  的源字如第一列所示; 采用我们所提的 EMC 编码方法时, 长度为 5 的码字如第三列所示, 可计算得总能耗为 1.47; 在不进行编码时, 因为码字即为源字, 码字长度没有变长从而可以节省一些接收能耗, 但因为 ACW 较大, 需要更多的传输能耗, 在按源字码重小的与概率大的一一匹配的优化考虑下, 其总能耗为 1.56, 依然大于 EMC 方法; 在源字概率给定时, ME 编码<sup>[10]</sup>方法的总能耗由所选的优化码本及其码长决定, 若所选择的优化码本的 ACW 及码字长度都与 EMC 相同, 则两者总能耗相同; 常一编码<sup>[11]</sup>因码字中最多只有一个高位而传输能耗最小, 但增大的码字长度导致更多的接收能耗, 总能耗不一定小, 例如,  $m = 3, K = 8$  时, 所用码字如表 1 最后一列所示 ( $n = 7$ ) 时, 其总能耗为 1.5, 比 EMC 总能耗大. 使用 MEC 编码<sup>[9]</sup>方法, 在源字长度  $m = 4$ , 码字长度  $n = 32$ , 码距  $d = 3$  时, 总能耗为 2.2575; 而使用 EMC 方法时, 在  $m = 6, n = 56, d = 1$  时, 总能耗为 1.6538; 可见, 能纠正一个错位的 MEC 在保证一定通信可靠性的同时必须耗费更多的能量. 如果采用我们的方法计算接收能耗, MTE 编码<sup>[8]</sup>方法的总能耗与 EMC 方法基本一致.

表 3 码率与码长约束下的能耗 ( $K = 100$ )

最小码率	最长码长	源字长度	码字长度	能耗
0.3	40	8	26	4.4906
0.5	40	16	32	7.4752
0.7	40	31	40	14.1973
0.2	80	16	80	10.9493
0.4	80	31	77	14.5692
0.6	80	45	75	19.3913
0.8	80	63	78	28.4174

表 3 所示是源字等概率出现且源字个数  $K = 100$  时, EMC 在给定最长码长  $N$  及码率阈值  $\rho$  时的总能耗情况, 满足最大码重要求及约束  $n = \min \{K - 1, N, \lfloor m/\rho \rfloor\}$ . 对于码字数  $K = 100$ , 源字长度  $m = 8$  时, 采用常一编码方法时, 由于每个码字最多只包含 1 个高位, 码字长度必须为  $K - 1 = 99$ , 码率为  $8/99 \approx 0.0808$ , 总能耗为 10.89; 而采用 EMC, 如表 3 所示, 码长为 26, 是前者的 26.3%, 码率能保证至少 0.3, 约为前者的 3.7 倍, 总能耗为 4.4906, 只有前者的 41.2%.

如图 1 所示是不同编码方法的总能耗对比情况,  $K$  个源字等概率出现且源字长度  $m = 8$ , 分别采用不编码、常一编码 (码长为  $K - 1$ )、EMC (满足最长码长为 24 且最小码率为  $1/3$  的约束) 这三种方法. 从图中可见: (1) EMC、常一编码的总能耗趋势是递增的, 而不编码的总能耗为定值; (2) EMC 方法总能耗在源字数较少 (例

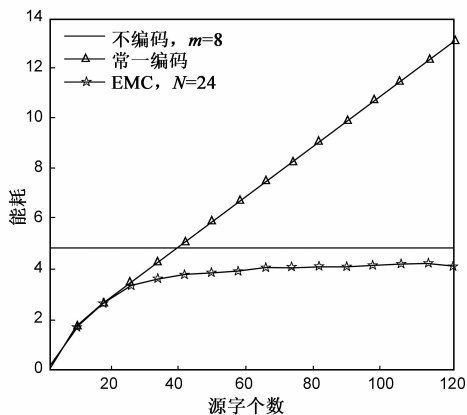


图1 能耗比较情况

如 10、18、26) 时稍优于常一编码,此后由于常一编码的码长增长使得接收能耗不断增大,而 EMC 的码长是定值  $N$ ,接收能耗不变,EMC 明显优于常一编码;(3) EMC 优于不编码方法,需要注意的是 EMC 的码长直接影响接收能耗,在码长较大的情况下,接收能耗较大,可能会出现不编码的总能耗优于 EMC 的情况.所以,编码时必须合理确定码长等参数并综合考虑传输能耗和接收能耗,才能更好的保证能量有效性.如图 2 所示是最小化总能耗的优化码字长度  $n$  与最大码重  $w_{\max}$ ,其中  $m$  取值范围为  $[1, 20]$  且  $K = 2^m$  个源字等概率出现;例如,当  $m = 17$  时,可确定优化码长  $n = 28$  能保证总能耗最小,此时对应的最大码重  $w_{\max} = 6$ ;由于综合考虑传输能耗与接收能耗, $n$  并不是随着  $m$  变大而单调递增.

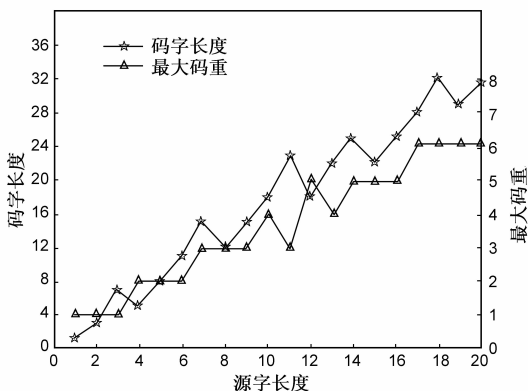


图2 最小化能耗的码字长度与最大码重

## 5 总结

WNSN 中的节点由于其尺寸及当前技术所限,所能存储的能量极其受限,能量有效性是 WNSN 中必须优先考虑的重要问题.通信能耗是无线传感器网络节点最主要的能耗<sup>[15]</sup>,本文针对 WNSN,对通信能耗进行分析,综合传输能耗与接收能耗建立能耗模型;在 ME 编码思想的基础上,提出 WNSN 中的 EMC 方法,基于最大

码重建优化码本;由于通信能耗与码长直接相关,码长的选择是最小化通信能耗必须考虑的重要因素,讨论最小化能耗的优化问题,求解相应的优化码长及最大码重.通过数据分析,表明 EMC 能够节省总能耗,能够满足码长、码率约束,具有较好的能量有效性.WNSN 是一种新的网络架构,许多相关的理论与技术问题尚待继续深入研究,纳米节点的资源 and 能量极为有限,对于实用的 WNSN,很有必要进一步深入研究编码/解码的复杂度及其能耗.另外,在 WNSN 中,必须考虑能量有效性、通信可靠性、带宽和信道容量等性能之间的权衡,这是我们下一步的工作.据我们所知,目前基于电磁波通信的 WNSN 的中文文献极少,希望本文对 WNSN 及其能量有效性的进一步研究起到一定的促进及借鉴作用.

## 致谢

匿名审稿专家细致的评审意见非常有益于本文质量的提高,作者在此表示诚挚感谢!

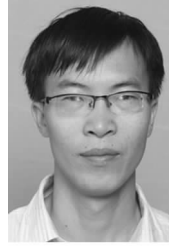
## 参考文献

- [1] Akyildiz I F, Jornet J M. Electromagnetic wireless nanosensor networks[J]. *Nano Communication Networks*, 2010, 1(1): 3 - 19.
- [2] Akyildiz I F, Jornet J M. The internet of nano - things[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2010, 17(6): 58 - 63.
- [3] Akyildiz I F, Brunetti F, Blázquez C. Nanonetworks: A new communication paradigm [J]. *Computer Networks*, 2008, 52 (12): 2260 - 2279.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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, Netherland; IEEE Press, 2014. 492 - 496.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Kocaoglu M, Akan O B. Minimum energy channel codes for

nanoscale wireless communications [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(4): 1492 – 1500.

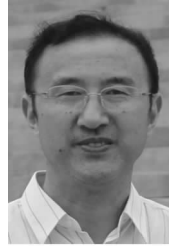
- [10] Erin C, Asada H H. Energy optimal codes for wireless communications [A]. 1999 IEEE CDC [C]. Phoenix, USA: IEEE Press, 1999. 4446 – 4453.
- [11] Prakash Y, Gupta S K. Energy efficient source coding and modulation for wireless applications [A]. 2003 IEEE WCNC [C]. New Orleans, USA: IEEE Press, 2003. 212 – 217.
- [12] Jornet J M, Akyildiz I F. Information capacity of pulse-based wireless nanosensor networks [A]. 2011 IEEE Communications Society Conference on SECON [C]. Salt Lake City, USA: IEEE Press, 2011. 80 – 88.
- [13] 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 [C]. Kyoto, Japan: IEEE Press, 2011. 1 – 6.
- [14] Akyildiz I F, Jornet J M, Han C. Terahertz band: Next frontier for wireless communications [J]. Physical Communication, 2014, 12: 16 – 32.
- [15] 奎晓燕, 杜华坤, 梁俊斌. 无线传感器网络中一种能量均衡的基于连通支配集的数据收集算法 [J]. 电子学报, 2013, 41(08): 1521 – 1528.  
KUI Xiao-yan, DU Hua-kun, LIANG Jun-bin. An energy-balanced connected dominating sets for data gathering in wireless sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(08): 1521 – 1528. (in Chinese)

## 作者简介



**黄龙军** 男, 1976 年生于福建连城. 博士生, 讲师, 研究方向为电磁纳米网络、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, 国家级“万人计划”首批教学名师, 享受国务院特殊政府津贴, 浙江工业大学计算机科学与技术学院院长, 研究方向为计算机智能、自动化和无线网络.

E-mail: wwl@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电磁纳米网络.

E-mail: xwyao@zjut.edu.cn