

分簇无线传感器网络中根校验全分集 LDPC 码设计与能效分析

郭锐^{*①} 刘春于^① 张华^② 包建荣^{①③} 姜斌^①

^①(杭州电子科技大学通信工程学院 杭州 310018)

^②(中国航天电子技术研究院卫星导航系统工程中心 北京 100094)

^③(东南大学移动通信国家重点实验室 上海 200433)

摘要: 高效的差错控制编码技术(ECC)可以增强无线传感器网络传输稳定性、网络的能量利用效率。为了充分利用无线传感器网络中蕴含的分集资源应对恶劣信道环境导致的高差错概率, 该文研究了基于根校验全分集 LDPC 码的差错控制编码技术。首先, 提出在分簇无线传感器网络中, 基于根校验全分集 LDPC 码的编码方案; 其次, 设计了适用于所提方案的速率兼容全分集 LDPC 码字结构。最后, 分析了所提编码系统的能效。仿真结果表明, 在信道条件较差的环境中(仿真中, 信道噪声大于 4×10^{-4} mW), 采用该文的编码方案, 能够显著提高无线传感器网络的能效。

关键词: 无线传感器网络; 差错控制编码; 能效; 全分集; 低密度奇偶校验

中图分类号: TP393; TN911.22

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)07-1580-06

DOI: 10.11999/JEIT141294

Full Diversity LDPC Codes Design and Energy Efficiency Analysis for Clustering Wireless Sensor Networks

Guo Rui^① Liu Chun-yu^① Zhang Hua^② Bao Jian-rong^{①③} Jiang Bin^①

^①(Communication College, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

^②(GNSS System Engineering Center, China Academy of Aerospace Electronics Technology, Beijing 100094, China)

^③(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Efficient Error Control Coding (ECC) can be used to enhance the stability and energy efficiency of Wireless Sensor Networks (WSNs). In order to deal with high bit error probability due to poor channel environment in WSNs, the paper study the error control coding techniques based on full diversity root check Low Density Parity Check (LDPC) codes, which takes advantage of the diversity resources in a wireless sensor network. Firstly, the encoding scheme based on root check full diversity LDPC code is put forward in clustering WSNs, then the diversity gain is analyzed. Secondly, the structure of rate compatible full diversity LDPC codes for the proposed scheme is proposed. Finally, the energy efficiency of the coding WSNs system is given. Simulation results show that the proposed coding scheme can significantly improve the energy efficiency of wireless sensor networks in poor channel conditions environment (In the simulation, channel noise is greater than 4×10^{-4} mW).

Key words: Wireless Sensor Networks (WSNs); Error Control Coding (ECC); Energy efficiency; Full diversity; Low Density Parity Check (LDPC)

1 引言

传感器节点能量有限, 无线传感器网络差错控制技术需要在纠错性能和能耗之间折中。文献[1]首次以能效(energy efficiency)作为无线传感器网络差错控制技术能量消耗和可靠性之间折中的度量。近年来, 文献[2,3]研究了基于 LT 喷泉码分布式不等错误保护(Un-equal Error Protecting, UEP)的差错控制方案; 文献[4]对无线传感器网络中喷泉码的度分

布进行了优化设计。文献[5]提出了在无线传感器网络中采用非二进制码字的纠错编码方案。文献[6]研究了 Raptor 码字的纠错编码方案。随着 LDPC 码编译码技术的发展, 文献[7]研究了 LDPC 码在无线传感器网络中的纠错性能。文献[8]研究了采用 ALOHA 协议的无线传感器网络中, 基于 LDPC 码的编码方案与码字速率设计。以上无线传感器网络纠错编码方案中, 不论采用何种编码码字, 都采用发端重传的 ARQ 机制, 但重传不仅会导致能耗的增加, 而且在较差的信道环境中, 收效甚微。

2014-10-09 收到, 2015-04-03 改回, 2015-06-01 网络优先出版

*通信作者: 郭锐 guorui@hdu.edu.cn

在无线传感器网络中，传感器节点采集的数据经不同的路由路径到达汇聚节点，其中蕴含着分集资源。根校验全分集 LDPC 码在块衰落信道下能取得分集增益^[9-11]；文献[12]通过设计特殊结构的 LDPC 码字在中继信道上实现不同的分集。文献[13]研究了无线传感器网络中通过空时编码，利用其协作分集的方式来提高编码性能的方法。因此，本文设计在无线传感器网络中能取得全分集根校验 LDPC 码的结构，并给出编码方法与能耗。

2 分簇无线传感器网络结构

分簇无线传感器网络结构如图 1 所示，图中标出了 A, B, C 3 三个簇，节点被分成若干个簇，每簇由一个簇头节点和若干个簇成员节点组成。簇内的传感器节点将探测到的信息传递到簇头节点，簇头节点对收集到的本簇数据进行融合处理后传给汇聚节点(汇聚节点通常不受能量限制约束)。

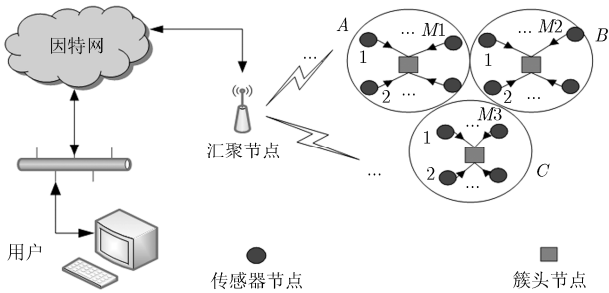


图 1 分簇无线传感器网络体系结构图

为了提高簇内通信的分集增益，降低因信道恶化或部分节点通信能力降低而导致整个传感器网络性能的下降，簇内传感器节点可以采用编码协作的方式与簇头进行通信。本文研究存在簇内编码协作情况下，根校验全分集 LDPC 码的构造与编码方案。首先，研究所采用的编码协作方案的固有分集；其次，设计速率兼容根校验全分集 LDPC 码并分析所提编码方案的能效。

3 无线传感器网络簇内编码协作通信

3.1 簇内编码协作通信方案

如图 2 所示，假设簇内两相邻节点 S_1, S_2 (称为伙伴节点)进行编码协作将数据传递给簇头节点 D 。簇内传感器节点以 TDMA 的方式与簇头进行通信，在第 1 帧，每个节点向伙伴节点和簇头节点广播自己的信息，在第 2 帧， S_1 或 S_2 根据能否正确的译码出接收到伙伴节点的信息(第 1 帧时采用 CRC 校验)，要么传输伙伴节点的信息，要么传输自己节点的信息。可以分为以下 4 种情况：

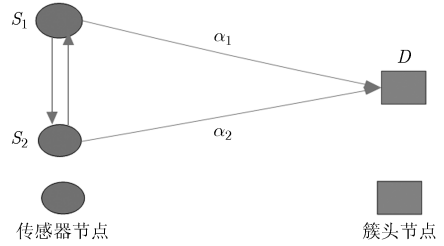


图 2 簇内 2 节点编码协作通信示意图

假设第 1 帧、第 2 帧传输的码字长度分别为 N_1, N_2 ，则在一个传输过程总码长 $N = N_1 + N_2$ 。协作水平为 $b = N_2 / N$ 。 C_{11} 为节点 S_1 第 1 帧传输的数据， C_{12} 为节点 S_1 第 2 帧传输的数据， C_{21} 为节点 S_2 第 1 帧传输的数据， C_{22} 为节点 S_2 第 2 帧传输的数据(节点 S_1 和节点 S_2 在不同的时隙发送)。

簇头节点 D 需要知道当前传输采用以上哪种协作方式，这里采用节点 S_1, S_2 在传输中增加 1 bit 数据来指示当前状态。

3.2 编码协作方案的固有分集

编码码字的分集阶数等于系统固有分集数时称为全分集，假设接收端已知信道状态信息，信道增益服从平坦瑞利衰落，传感器节点 i 与簇头节点之间的瞬时信噪比记着 $\gamma_{i,d}(n)$ ，则 $g_{i,d}(n)$ 服从指数分布，其均值记为 $\Gamma_{i,d} = E[\gamma_{i,d}(n)]$ 。其成对差错概率(Pairwise Error Probability, PEP)表示为^[14]

$$P(c \rightarrow e | \gamma) = Q \left(\sqrt{2 \sum_{n \in \eta} \gamma(n)} \right) \quad (1)$$

$\gamma(n)$ 为接收端瞬时信噪比。 c 是传输的码字， e 是译码后的码字。 η 是所有 $c(n) \neq e(n)$ n 的集合。 $|\eta| = d$ 是 c 和 e 之间的汉明距离。收发两端相互独立情况下，则条件成对差错概率可以表示为 $P(d | \gamma)$ 。

假设簇内每个传感器节点传输的两帧期间，信道的衰落保持不变，不同传感器节点传输期间，信道衰落不同，即 $\gamma_{i,d}(n) = \gamma_{i,d}(n = 1, 2, \dots, N), i, j \in \{1,$

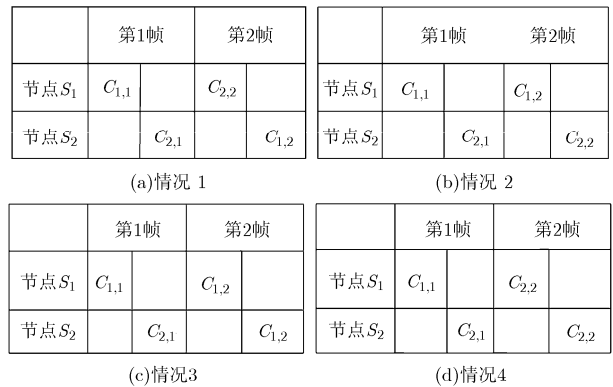


图 3 两节点编码协作传输帧结构图

2}。因此，编码协作情况 1 下，节点 S_1 的条件 PEP 可以表示为

$$P(d | \gamma_{1,d}, \gamma_{2,d}) = Q\left(\sqrt{2d_1\gamma_{1,d} + 2d_2\gamma_{2,d}}\right) \quad (2)$$

d_1, d_2 分别为节点 S_1 , 节点 S_2 发生错误的比特数。 $d_1 + d_2 = d$ 。因此，有 d 位发生错误的 PEP 表示为

$$P(d) = \int_0^\infty \int_0^\infty P(d | \gamma_{1,d}, \gamma_{2,d}) P(\gamma_{1,d}) P(\gamma_{2,d}) d\gamma_{1,d} d\gamma_{2,d} \quad (3)$$

$P(\cdot)$ 表示概率密度函数。利用 Q 函数的替代形式以及矩母函数(MGF)，可得

$$P(d) \leq \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1 + d_1 \Gamma_{1,d}} \right) \left(\frac{1}{1 + d_2 \Gamma_{2,d}} \right) \quad (4)$$

$\Gamma_{1,d}, \Gamma_{2,d}$ 分别为相应节点 S_1 , 节点 S_2 发送时链路瞬时信噪比均值。当 d_1, d_2 非 0，信噪比较大时， $P(d) \propto 1/(\Gamma_{1,d} \Gamma_{2,d})$ ，即分集阶数为 2。

4 全分集 LDPC 码字的构造与实现

图 4 给出了在迭代译码算法下能取得分集阶数为 2 的全分集 LDPC 码的校验矩阵，称为根校验全分集 LDPC 码。图中 \mathbf{I} 为单位矩阵， $\mathbf{0}$ 为零矩阵。其中， $1C, 2C$ 为根校验节点， $1C$ 通过度数为 1 的根连接与信息比特 $1i$ 相连，而与信息比特 $2i$ 、奇偶校验比特 $2p$ 则以任意度数连接，其度数由 $\mathbf{H}_{2i}, \mathbf{H}_{2p}$ 的列重决定；同样， $2C$ 通过度数为 1 的根连接与信息比特 $2i$ 相连，而与在 α_1 上传输的信息比特 $1i$ 、奇偶校验比特 $1p$ 则以任意度数连接，其度数由 $\mathbf{H}_{1i}, \mathbf{H}_{1p}$ 的列重决定，连线上的数字表示连接的度。假如传输过程中， $2i$ 发生了丢失或者不能译码成功， $1i$ 能够成功译码。采用根校验全分集 LDPC 码字能够通过译码恢复 $2i$ 。

在无线传感器网络中采用所提协作编码方案，编码后的码字分为两帧，传感器节点 S_1, S_2 与簇头节点需要实现对不同速率码字的编译码操作，因此需要设计速率兼容的全分集 LDPC 码，其校验矩阵构造如图 5 所示。

设计速率兼容 LDPC 码，主要有两种方法：打孔和扩展。扩展法设计速率兼容 LDPC 码通过增加校验比特来获得可变的速率。如图 6 所示，编码比特被分成 3 部分，信息比特 i ，两类校验比特 $1p, 2p$ 。

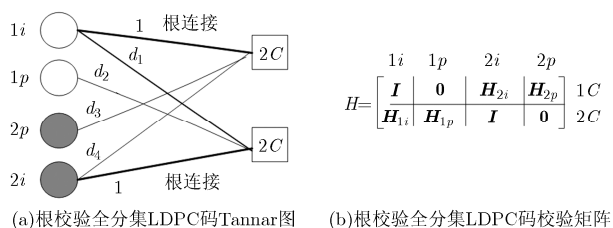


图 4 根校验全分集 LDPC 码的 Tanner 图及其校验矩阵

第 1 帧，传输信息比特 i 、校验比特 $1p$ ；第 2 帧，假设协作节点能正确译码接收到的信息，传输校验比特 $2p$ 。

将结构如图 4 的全分集 LDPC 码校验矩阵嵌入到图 5 所示结构的 LDPC 中，代替上述结构码字的 \mathbf{H}_2 部分，实现速率兼容全分集 LDPC 码的设计。若要使 $2p$ 和 $2i$ 具有相同的编码增益，需要对称的码字结构。将图 5 码结构中的 \mathbf{H}_1 以及 0 填充部分，用 \mathbf{H}_{1s} 和 \mathbf{H}_{1r} 代替，得到如图 6 所示的速率兼容根校验全分集 LDPC 码。

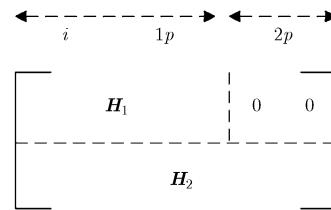


图 5 速率兼容 LDPC 码校验矩阵构造示意图

\mathbf{H}_{1s} 保护 $1i, 1p$ ， \mathbf{H}_{1r} 保护 $2i, 2p$ 。为了方便起见， $\mathbf{H}_{1s}, \mathbf{H}_{1r}$ 可以具有同样的结构。假设 \mathbf{H}_{1s} 的度分布多项式为 $(\lambda_1(x), \rho_1(x))$ ，根校验全分集 LDPC 码的度分布多项式为 $(\lambda_2(x), \rho_2(x))$ ，则构造的速率兼容根校验全分集 LDPC 用多项式 $(\lambda_1(x), \rho_1(x), \lambda_2(x), \rho_2(x))$ 来表示。 $\mathbf{H}_{1s}, \mathbf{H}_{1r}$ 在满足度分布的情况下，可以随机生成，也可是具有 QC 结构的校验矩阵。为了方便对 $\mathbf{H}_{1s}, \mathbf{H}_{1r}$ 系统化， $\mathbf{H}'_{p1}, \mathbf{H}'_{p2}$ 设计成满秩矩阵。 $\mathbf{H}'_{p1}, \mathbf{H}'_{p2}$ 是 $\mathbf{H}_{1s}, \mathbf{H}_{1r}$ 最右侧的方阵。 \mathbf{H}_2 具有全分集 LDPC 码结构。

编码时，首先根据 $\mathbf{H}_{1s}, \mathbf{H}_{1r}$ 确定校验位 p'_1, p'_2 ，再根据 \mathbf{H}_2 决定 $(1p, 2p)$ 。然后将矩阵通过列变换实现系统化。译码时候，可以根据上述 4 种情况进行译码，比如在情况 1，汇聚节点将接受到的两帧组合起来，在包含 $\mathbf{H}_{1s}, \mathbf{H}_{1r}$ 以及 \mathbf{H}_2 的矩阵上进行译码。在情况 4，只需要第 1 帧在 \mathbf{H}_{1s} 上译码。

5 所提编码方案的能效分析

无线传感网络中，能量消耗包括发送和接收端所有电路模块的能耗和发射能耗^[15]，如图 7 所示。

各参数的含义如下： $P_{DAC}, P_{mix}, P_{LAN}, P_{IFA}, P_{filt}, P_{ADC}, P_{enc}$ 和 P_{dec} 分别表示 D/A 转换器、混频器、低噪放大器、中频放大器、接收端滤波器、A/D 转换器，LDPC 编码器和 LDPC 译码器每处理 1 bit 的能耗，发射端电路能耗：

$$P_{tra} = (P_{DAC} + P_{mix} + P_{filt} + P_{enc}) \quad (5)$$

对于 BPSK 调制系统，在给定比特错误概率 \bar{P}_b 时的

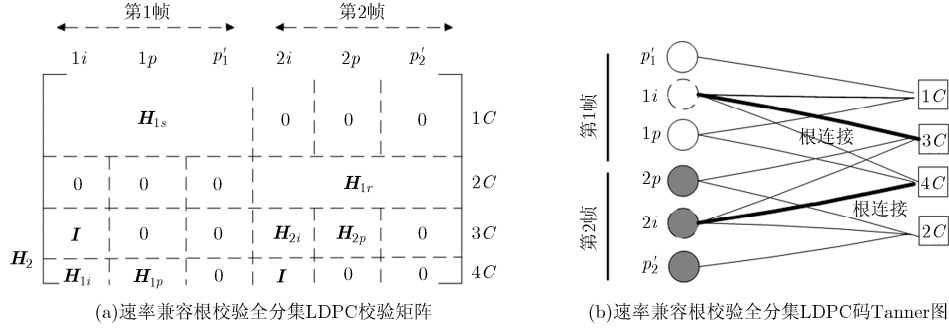


图6 速率兼容根校验全分集 LDPC 校验矩阵及 Tanner 图

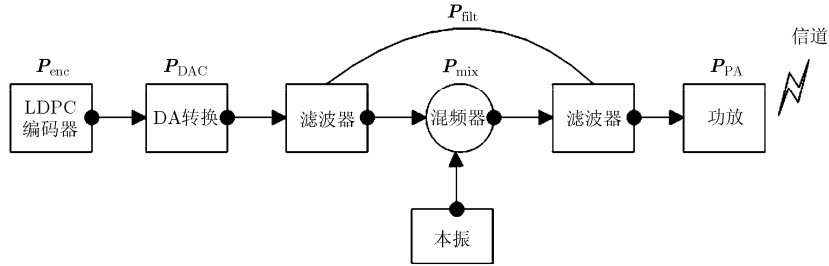


图7 发射机电路模型及能耗示意图

P_{PA} 表示为^[16]系统的发射能耗:

$$P_{PA} = (1 + \alpha) \frac{M_t N_0}{\bar{P}_b^{1/M_t}} \times \frac{(4\pi d)^2}{G_t G_r \lambda^2} M_t N_f R_b \quad (6)$$

式中 $\alpha = (\varepsilon / \kappa) - 1$, ε 调制星座的峰均比, κ 是 RF 功率放大器的泄露效率, \bar{P}_b 为平均误比特率, R_b 为比特传输速率, N_0 为单边带噪声功率谱密度, M_t 是硬件过程变化和其它加性背景噪声以及其它干扰的连接边缘补偿, $N_f = N_r / N_0$ 为接收噪声模型, N_r 为输入端总的噪声功率谱密度, G_t, G_r 分别表示发射机和接收机的天线增益, 为链路边缘补偿, d 为传输距离, λ 和发射频率有关。

接收端电路耗能:

$$P_{Rec} = (P_{LAN} + P_{mix} + P_{IFA} + P_{filt} + P_{ADC} + P_{dec}) \quad (7)$$

总消耗能耗=接收端电路能耗 P_{Rec} + 发射端电路能耗 P_{trans} + 系统的发射能耗 P_{PA} 。以一含有 M 个传感器节点的簇为例, 其中每两个相邻的传感器节点进行编码协作, 与簇头节点进行通信。这里假设完全协作(情况 1), 协作水平 $\beta = 0.5$ 。假设第 1 帧传输 K bit 信息, 编码后码字长度为 $N/2$ (两帧总长为 N) (忽略循环冗余码校验(Cyclic Redundancy, CRC)校验位长度), 则总能耗为

$$P_{total} = (P_{trans} \cdot 2 \cdot N + P_{Rec} \cdot 2 \cdot N + P_{PA} \cdot N) \quad (8)$$

因此, 传感器节点传输 1 bit 有效信息需能耗(能效):

$$P_u^{inter} = P_{total} / (2K)。即$$

$$P_u^{inter} = 4P_{trans} / R_b + 4P_{Rec} / R_b$$

$$+ 2L(1 + \alpha) \frac{M_t N_0}{\bar{P}_b^{1/M_t}} \times \frac{(4\pi d)^2}{G_t G_r \lambda^2} M_t N_f \quad (9)$$

6 仿真结果与分析

本节研究了所提算法的性能。首先仿真了所构造码字的文字差错率(Word Error Rate, WER)性能。实验中, 分别仿真了(3,9,3,6)规则根校验全分解 LDPC 码与非规则根校验全分集 LDPC 码的性能, 码字的校验矩阵结构如图 6 所示, 码率分别 $R_c = 1/3$ 和 0.45。非规则码字多项式分布 $(\lambda_1(x), \rho_1(x), \lambda_2(x), \rho_2(x))$ 表示为

$$\lambda_1(x) = 0.1989x + 0.2305x^2 + 0.0068x^5 + 0.2774x^6 \\ + 0.14267x^{19} + 0.1335x^{20} + 0.0102x^{21}$$

$$\rho_1(x) = x^{12}$$

$$\lambda_2(x) = 0.22767x + 0.20333x^2 + 0.2145x^5 \\ + 0.011048x^6 + 0.34346x^{19}$$

$$\rho_2(x) = 0.5x^7 + 0.5x^8$$

实验中, 采用 BPSK 调制, 噪声 $z_i \sim N(0, \sigma^2)$, $\sigma^2 = N_0 / 2$, 信道的衰落 α_j 服从独立的瑞利分布, 译码采用 BP 迭代译码算法, 最大迭代次数 50 次。每次重传的码字长度一样 $N = 6000$, 信息长度 $K = 2000$, 同时还比较了一同样码率的随机 LDPC 码性能。其 BER 性能如图 8, 图 9 所示。

同时为了比较所提编码方案与简单 LDPC 编码, 以及自动发送请求(Automatic Repeat Request, ARQ)方案的能效, 仿真了达到不同 BER 时, 传输每比特信息能效。采用 MATLAB 软件进行仿真, 网络的仿真环境为: 100 个初始能量为 0.5 J 的传感

器节点随机地分布在半径为 100 m 的圆形区域内，Sink 节点在圆心处，仿真网络参数如表 1 所示。

图 10 显示了当 WER 为 10^{-3} 时，未编码传输方

表 1 网络的其它参数设置

网络区域	半径 100 m 的圆形
节点数目	100 个
汇聚节点位置	圆心
节点 ID	1,2,...,100
节点初始能量	0.5 J
每次发送数据包大小	6000 bit
广播数据包大小	37 bit
控制包大小	150 bit
簇头比例	5%
电路消耗	50 pJ/bit
A/D 消耗	50 pJ/bit
放大器消耗	0.0013 pJ/bit/m ²
传输介质损耗	10 pJ/bit/m ²
带宽	10 kHz

案、采用文献[17]方法构造的随机 LDPC 码编码方案、ARQ 随机 LDPC 编码方案和本文构造的非规则根校验 LDPC 码编码方案传输单位比特的能耗，从图中可以看出，未编码方案，在噪声功率较低时，能耗较低，随着噪声的增加，需要显著地增加发射功率来达到特定的 WER，应用 FEC 编码后，则噪声门限大大提高，而且随着噪声的增加，成功传输每比特消耗的能耗增加缓慢，即在信道条件较差的环境，本文构造的码字性能更优。图 11 给出了达到误比特率为 10^{-4} 时，能耗对比情况，得到与图 10 相同的结论，只是，此时噪声门限要比图 10 低。

从图 10，图 11 中可以看出，当信道噪声较小时，不用 FEC 编码或者用一些冗余度低的简单编码，反而更节能；当信道条件差时，需要利用纠错能力强的编码。因此，需要在 FEC 的可靠性所带来的能量节省与 FEC 编解码能耗和冗余度之间寻找一个平衡。

为了验证本文提出的基于根校验全分集 LDPC 码在对抗某一链路突然恶化时的优势，本文仿真了源节点-目的节点信道，与协作中继信道经历不同噪

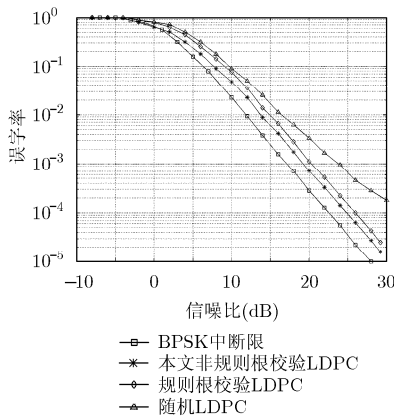


图 8 不同码字性能比较($R_c=1/3$)

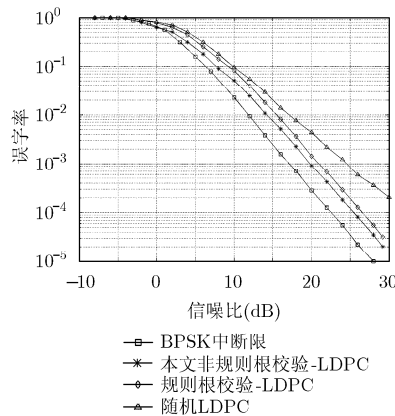


图 9 不同码字性能比较($R_c=0.45$)

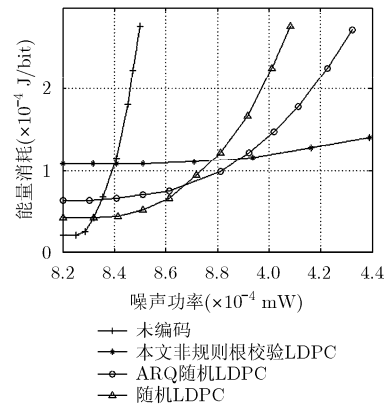


图 10 各种传输方案能耗 ($WER = 10^{-3}$)

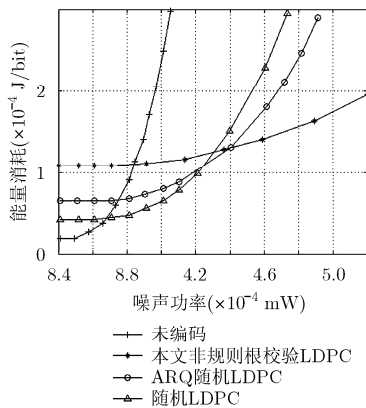


图 11 各种传输方案能耗图 ($WER = 10^{-4}$)

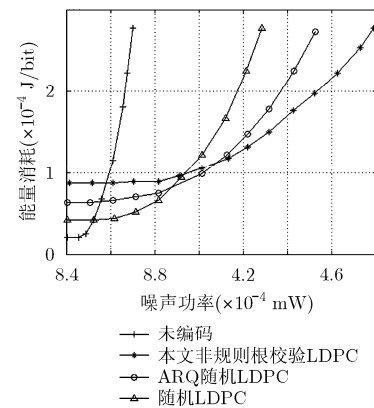


图 12 源-目的信道与协作信道不同噪声性能 ($BER = 10^{-4}$)

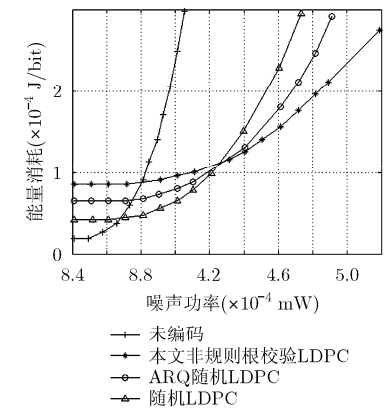


图 13 源-目的信道与协作信道不同噪声性能 ($BER = 10^{-3}$)

声影响时的能效, 假设协作信道上噪声比源-目的信道的噪声小(小 0.5×10^{-4} mW)。图 12, 图 13 采用文献[17]方法构造的随机 LDPC 码编码方案, ARQ 随机 LDPC 编码方案和本文构造的非规则根校验 LDPC 码编码方案能量消耗比较。可以明显看出, 采用本文所提全分集根校验 LDPC 码能够降低能耗。这是因为基于根校验全分集 LDPC 的编码方案中, 信道条件较好的协作信道可以弥补源部分性能损失。

7 结束语

本文研究了分簇无线传感器网络中, 基于全分集 LDPC 码的编码协作簇内通信方案, 并给出速率容根校验全分集 LDPC 码的设计。以能效作为最终目标, 给出了各种编码方案的能效分析, 仿真结果表明, 在信道条件较差的情况下, 采用根校验全分集 LDPC 码能够降低无线传感器网络的能耗, 提高网络的生命期。

参 考 文 献

- [1] Sankarasubramaniam Y, Akyildiz I F, and McLaughlin S W. Energy efficiency based packet size optimization in wireless sensor networks[C]. Proceedings of the 1st IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications, Anchorage, AK, USA, 2003: 1-8.
- [2] Yue J, Lin Z, Li J, *et al.* Unequal error protection distributed network-channel coding based on LT codes for wireless sensor networks[C]. Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Shanghai, China, 2013: 1482-1487.
- [3] Jafarizadeh S and Jamalipour A. Data persistency in wireless sensor networks using distributed luby transform codes [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(12): 4880-4890.
- [4] Yue J, Lin Z, Vucetic B, *et al.* The design of degree distribution for distributed fountain codes in wireless sensor networks[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), Sydney, Australia, 2014: 5796-5801.
- [5] Qassim Y and Magana M E. Error-tolerant non-binary error correction code for low power wireless sensor networks[C]. Proceedings of the International Conference on Information Networking (ICOIN), Phuket, Thailand, 2014: 23-17.
- [6] Yue J, Lin Z, Vucetic B, *et al.* Performance analysis of distributed raptor codes in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(10): 4357-4368.
- [7] Rahhal J S. LDPC coding for MIMO wireless sensor networks with clustering[C]. Proceedings of the International Conference on Digital Information and Communication Technology and its Applications (DICTAP), Bangkok, Thailand, 2012: 58-61.
- [8] Kissling C and Clazzer F. LDPC code performance and optimum code rate for contention resolution diversity ALOHA[C]. Proceedings of the IEEE Global Communications Conference, Atlanta, GA, USA, 2013: 2932-2938.
- [9] Boutros J J, Guillen I, Fabregas A, *et al.* Low-density parity-check codes for nonergodic block-fading channels[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2010, 56(9): 4286-4300.
- [10] Lechner G, Nguyen K D, Guillen I, *et al.* Optimal power control for LDPC codes in block-fading channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, 59(7): 1759-1765.
- [11] Healy C T and Lamare R C D. Full diversity LDPC codes with a reduced structure for general block fading channels[C]. Proceedings of the Tenth International Symposium on Wireless Communication Systems, Ilmenau, Germany, 2013: 1-5.
- [12] Paola P, Gianluigi L, and Marco C. Unequal diversity LDPC codes for relay channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(11): 5646-5655.
- [13] Tian Z. Distributed space-time coding with decode-and-forward-amplify-and-forward selection relaying protocol in cooperative wireless sensor networks[J]. *IET Wireless Sensor Systems*, 2013, 3(1): 9-15.
- [14] Hunter T E, Sanayei S, and Nosratinia A. Outage analysis of coded cooperation[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(2): 375-391.
- [15] Balakrishnan G, Mei Y, Yingtao J, *et al.* Performance analysis of error control codes for wireless sensor networks[C]. Proceedings of the Fourth International Conference on Information Technology, Las Vegas, NV, USA, 2007: 876-879.
- [16] Xiao H and Banihashemi A H. Improved progressive-edge-growth (PEG) construction of irregular LDPC codes[J]. *IEEE Communications Letters*, 2004, 12(8): 715-717.
- [17] MacKay D J C. Source code for progressive edge growth parity-check matrix construction[OL]. <http://www.phy.cam.ac.uk/Mackay/PEGCEC.html>, 2010.

郭 锐: 男, 1980 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为无线通信、信道编码等。

刘春于: 女, 1992 年生, 硕士生, 研究方向为无线通信、信道编码等。

张 华: 男, 1976 年生, 博士, 研究方向为无线通信。

包建荣: 男, 1978 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为无线通信、信道编码等。

姜 斌: 男, 1980 年生, 硕士, 研究方向为无线通信、信道编码等。