

面向能量收集的编码协作系统性能与码的设计研究

张顺外¹, 仰枫帆², 宋荣方¹

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003;
2. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏 南京 210016)

摘要:为解决编码协作系统中继节点的能量受限问题,研究了面向能量收集的编码协作系统。首先,提出了面向能量收集的重复积累(repeat-accumulate, RA)编码协作方案,分析了系统的中断概率;其次,推导出了对应于信源节点与协作中继采用的 RA 码的联合校验矩阵,并通过联合设计,消除了该矩阵中所有两种类型的 girth-4 环。理论分析与仿真结果表明,与传统非能量收集的点对点系统比,所提方案大大降低了系统中断概率。与采用随机低密度奇偶校验码(low density parity-check, LDPC)码的编码协作方案相比,采用联合设计 RA 码的系统误码性能更为优越。

关键词: 编码协作; 能量收集; RA 码; 联合校验矩阵; girth-4 环

中图分类号: TN 911

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2016.12.27

Performance analysis and codes design of coded cooperation with energy harvesting

ZHANG Shun-wai¹, YANG Feng-fan², SONG Rong-fang¹

(1. College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China; 2. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to break through the energy limitation of the relay in the coded cooperation system, a coded cooperation scheme with the energy harvesting is investigated. Firstly, a repeat-accumulate (RA)-coded cooperation with energy harvesting is proposed, and the outage probability of the system is further analyzed. Then, the joint parity-check matrix corresponding to the RA codes employed by the source and relay is deduced. By jointly design the joint parity-check matrix, all the two types of girth-4 cycles in it are cancelled. Theoretical analysis and numerical simulations show that the proposed scheme sharply lowers the outage probability compared with the traditional point to point system under the same power condition. Furthermore, the bit error rate of the system employing jointly the designed RA codes is better than that of random LDPC codes.

Keywords: coded cooperation; energy harvesting; repeat-accumulate (RA) codes; joint parity-check matrix; girth-4 cycles

0 引言

编码协作^[1]结合了信道编码与协作技术,能同时获得编码增益和协作带来的优点,为一种性能优异的协作方式。低密度奇偶校验码(low density parity-check, LDPC)^[2-3]能够逼近 Shannon 限,基于 LDPC 码的编码协作^[4-6]能同时获得高编码增益与分集增益,应用前景广阔。若协作中继由能量受限的电池供电,系统的生存时间一定程度上受到制约。能量收集(energy harvesting, EH)技术^[7]从周围环境中收集能源

给节点供电,可很好地解决这个问题,故其受到广泛关注。传统的 EH 技术从周围自然环境中收集能量(如太阳能、风能等)。最近,将射频(radio-frequency, RF)信号作为能量源的 EH 技术成为研究热点,该技术能同时传输信息与能量,是一种解决通信系统生存时间的有效方法。不同于传统的 EH 技术,通过 RF 信号来传输能量给通信系统的设计带来一些新的问题,设计能同时实现 EH 和信息译码(information decoding, ID)的接收机是需要解决的首要问题,以及进一步研究接收机在 EH 和 ID 之间切换角色以增大信息速率与获

收稿日期:2016-03-18; 修回日期:2016-05-31; 网络优先出版日期:2016-07-17。

网络优先出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20160717.0949.006.html>

基金项目:国家自然科学基金(61271234, 61501256); 江苏省自然科学基金(BK20150857); 中国博士后科学基金(2014M561694); 南京邮电大学引进人才科研启动基金(214007)资助课题

取能量之间的折中区域,也是需要进一步解决的关键问题之一。针对基于 EH 技术的通信系统,文献[8]研究了 4 种的接收机结构,即分离接收机、时间切换接收机、功率分配接收机、天线切换接收机,并进一步分析了不同接收机的信息速率与获取能量之间的折中关系。文献[9]针对无线携能通信系统能量获取不均衡的问题,提出了基于能量比例公平的波束成形方案。该方案在满足最大发送功率和信干噪比等约束条件下,优化波束矢量达到能量获取的比例公平。

不少学者进一步研究了面向 EH 技术的协作通信系统,并得出了有价值的结论和成果。文献[10]研究了放大转发(amplify-and-forward, AF)中继协作系统,基于时间切换和功率分配两种接收机结构,中继节点分别利用基于时间切换中继协议和基于功率分配协议来实现能量收集和信处理。针对时延受限和时延容忍传输模式下,分别推导了系统中断概率和遍历容量的解析表达式。文献[11]针对 AF 协作,在信源和中继节点采用正交空时分组码传输数据,在瞬时信道状态信息已知情况下,设计了联合最优的信源与中继预编码方案来实现信息和能量传输的不同折中。文献[12]研究了多用户协作无线通信系统中 EH 技术,分布式的发送机发送独立的信息至相应的接收机,同时,通过能量波束成形协作发送无线能量至接收机。接收机采用基于时间切换协议在信息译码和能量收集模式之间切换。文献[13]介绍了能量协作概念,一个用户无线传输一部分自己的能量给另一能量收集用户。尽管在传输过程中有能量损失,但是通过优化不同接收端的能量,可提高整个系统性能。进一步通过拉格朗日公式和 KKT 优化条件,设计了能量管理策略以最大化系统吞吐量。文献[14]研究了面向 EH 技术的通信网络使用最优部分中继策略,中继节点通过部分中继网络协作协议帮助信源节点传输数据,基于网络参数来选择中继参数可以确保信源节点和中继节点数据队列的稳定性。文献[15]研究了基于能量收集的多用户中继通信系统,提出了基于能量分割接收的多用户协作通信协议,然后分析了该协议在瑞利衰落信道下的中断概率性能。目前,暂未见基于能量收集的编码协作系统的相关研究。

为了突破编码协作系统中继节点的能量限制,本文研究面向能量收集的编码协作系统。与已有编码协作研究工作相比,面向 EH 技术的编码协作最大的优势之处在于,协作中继从信源节点的 RF 信号中收集能量,并将其用于传输后续信息。协作中继无需额外的能量供给,故该系统能够突破协作中继节点的能量制约,进一步提升系统的能量使用效率与生存时间。

本文工作创新点主要包括以下两点:首先,提出采用一种结构化的 LDPC 码-重复累积(repeat-accumulate, RA)码的编码协作通信。为提升系统编码增益,对信源节点和协作中继采用的 RA 码进行联合设计。其次,针对面向能量

收集的 RA 编码协作通信系统,分析了系统中断概率和误码性能,并进一步通过数值仿真研究了系统性能。

1 面向能量收集的 RA 编码协作系统

面向能量收集的 RA 编码协作模型见图 1。信源节点 S 在中继节点 R 的协助下向目的节点 D 传送信息。其中信源节点和目的节点作为终端(基站等)可由外部电源供电,中继节点作为能量受限的无线移动设备由于体积等限制无法由外部电源供电^[10],故需要从信源节点发送的射频信号中收集能量,并将收集到的能量用于协作传送信息。

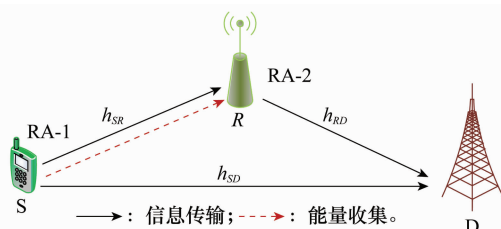


图 1 面向能量收集的 RA 编码协作系统

Fig. 1 Energy-harvesting-based RA-coded cooperation

在 S 处,第一个 RA 编码器(RA-1)将信息比特编码生成码字,经调制后分别通过 S 与 R 之间的信道(S-R 信道)和 S 与 D 之间的信道(S-D 信道)发送至 R 和 D。R 将接收的一部分信号用来译码(information decoding, ID)恢复出原始发送信息,将另一部信号能量收集起来,用于传输信息至 D。R 利用第二个 RA 编码器(RA-2)对译码得到的码字再次编码,并利用所收集的能量将校验序列经 R 与 D 之间的信道(R-D 信道)发送至 D。

2 编码协作系统 RA 码的联合设计

RA 码是一种结构特殊的 LDPC 码,可以不经高斯消元,直接利用稀疏校验矩阵编码,故矩阵的稀疏特性没有被破坏,同时编码所得码字是系统的。鉴于以上优点,并引入 QC-LDPC 码的准循环结构,本文介绍一种具有准循环结构的 RA 码,并将其应用于面向能量收集的编码协作系统,进一步对其进行联合设计。

2.1 RA 码

RA 码的校验矩阵示例如下:

$$\mathbf{H} = [\mathbf{A} \quad \mathbf{D}] =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, \mathbf{D} 是准对角矩阵,只有对角线元素和对角线下的元素为“1”,其余元素皆为“0”; \mathbf{A} 是稀疏矩阵。如果 \mathbf{A} 为正规的,则称该 RA 码为正规 RA 码;反之,如果 \mathbf{A} 为非正规的,则称该 RA 码为非正规 RA 码。若 \mathbf{A} 为随机的稀疏矩阵,则 RA 码的编译码复杂度过高、在硬件实现时内存消耗也

较大。故借鉴 QC-LDPC 码思想,本文研究 \mathbf{A} 具有准循环结构的 RA 码,该类 RA 码具有编译码简单、存储资源消耗少等特点。其结构进一步示例如下

$$\mathbf{H} = [\mathbf{A} \quad \mathbf{D}] =$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}(p_{1,1}) & \mathbf{I}(p_{1,2}) & \cdots & \mathbf{I}(p_{1,L}) & 1 & 0 \\ \mathbf{I}(p_{2,1}) & \mathbf{I}(p_{2,2}) & \cdots & \mathbf{I}(p_{2,L}) & 1 & 1 & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots & 0 & \vdots \\ \mathbf{I}(p_{J,1}) & \mathbf{I}(p_{J,2}) & \cdots & \mathbf{I}(p_{J,L}) & \cdots & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{I}(p_{j,i})$ 是由单位阵循环右移 $p_{j,i}$ 位所得循环移位矩阵。

2.2 RA 码的联合设计

本节研究面向能量收集的 RA 编码协作系统的编码实现及联合设计系统采用的 RA 码。

2.2.1 编码实现

采用 RA 码的编码协作系统实现如下:

(1) S 将信息比特序列 $\mathbf{s} = (s_1, \dots, s_{N-M_1})^T$ 经过 RA-1 编码生成码字

$$\mathbf{c}_1 = (s_1, \dots, s_{N-M_1}, p_1^{(1)}, \dots, p_{M_1}^{(1)})^T \quad (3)$$

该 RA 码对应的校验矩阵为

$$\mathbf{H}_1 = [\mathbf{A}_{M_1 \times (N-M_1)} \quad \mathbf{D}_{M_1 \times M_1}] \quad (4)$$

码字 \mathbf{c}_1 经广播信道分别发送至 R 和 D。

(2) R 对接收到的码字译码。若能实现正确译码, R 利用 RA-2 对恢复码字中的信息位再次编码,生成码字

$$\mathbf{c}_2 = (s_1, \dots, s_{N-M_1}, p_1^{(2)}, \dots, p_{M_2}^{(2)})^T \quad (5)$$

该 RA 码对应的校验矩阵为

$$\mathbf{H}_2 = [\mathbf{B}_{M_2 \times (N-M_1)} \quad \mathbf{D}_{M_2 \times M_2}] \quad (6)$$

因为码字 \mathbf{c}_1 和 \mathbf{c}_2 的信息位相同,故 R 只将 \mathbf{c}_2 的校验位 $(p_1^{(2)}, \dots, p_{M_2}^{(2)})$ 发送至 D。

(3) 在 RA 编码协作系统中,对目的节点 D 而言,整个编码协作系统的检验关系如下

$$\mathbf{H}\mathbf{c} = 0 \quad (7)$$

式中, $\mathbf{c} = (s_1, \dots, s_{N-M_1}, p_1^{(1)}, \dots, p_{M_1}^{(1)}, p_1^{(2)}, \dots, p_{M_2}^{(2)})^T$ 。即 \mathbf{c}_1 和 \mathbf{c}_2 的校验位构成一个长为 $N + M_2$ 的复合码字,与其对应的校验矩阵为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{M_1 \times (N-M_1)} & \mathbf{D}_{M_1 \times M_1} & \mathbf{0}_{M_1 \times M_2} \\ \mathbf{B}_{M_2 \times (N-M_1)} & \mathbf{0}_{M_2 \times M_1} & \mathbf{D}_{M_2 \times M_2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.2.2 RA 码联合设计

环特别是短环,会影响 RA 码的性能^[3]。若 RA 码存在围长为 4 (girth-4) 的环,则性能明显下降。因此,消去 girth-4 环是 RA 码设计的主要目标。

如图 2 所示, \mathbf{H} 中的 girth-4 环可分为两类,其中一类在 H_1 或 H_2 中,我们称之为 Type-I girth-4 环;另一类在 H_1 与 H_2 之间,我们称之为 Type-II girth-4 环。若分别对信源节点或协作中继采用的 RA 码进行单独设计,则仅能消除 \mathbf{H} 中的 Type-I girth-4 环。为同时消除校验矩阵中存在 Type-I 和 Type-II girth-4 环,需要对信源节点和协作中

继采用的 RA 码进行联合设计。

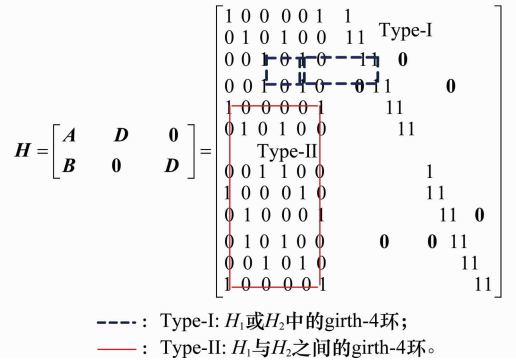


图 2 联合校验矩阵 Type-I 和 Type-II girth-4 环示意图

Fig. 2 Illustration of Type-I and Type-II girth-4 cycles in the joint parity-check matrix

分析联合校验矩阵 \mathbf{H} 的结构可知,其右侧

$$\begin{bmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{D} \end{bmatrix}$$

是准对角结构,不存在环。且由于 \mathbf{H} 的左侧 $\begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix}$ 为循环移位单位阵构成,其 girth-4 环的消除可以通过定理 1 来实现。

定理 1^[3] 假定联合校验矩阵左侧任意构成矩形的 4 个循环移位单位阵 $\mathbf{I}(p_{j,l})$ 、 $\mathbf{I}(p_{j+k,l})$ 、 $\mathbf{I}(p_{j,l+t})$ 、 $\mathbf{I}(p_{j+k,l+t})$ 对应的移位值分别为 $p_{j,l}$ 、 $p_{j+k,l}$ 、 $p_{j,l+t}$ 、 $p_{j+k,l+t}$ 。避免校验矩阵中存在 girth-4 环的充分必要条件为

$$(p_{j,l} - p_{j+k,l}) + (p_{j,l+t} - p_{j+k,l+t}) \neq 0 \pmod{B} \quad (9)$$

式中, B 为子矩阵的大小。证明文献[3]。

联合校验矩阵左侧的准循环移位单位阵与右侧的准对角矩阵也可能构成短环。该短环只可能存在于上下相邻的准循环移位单位阵之间,且只存在于上准循环移位单位阵的最后一行与下准循环移位单位阵的第一行。

定理 2 假定联合校验矩阵左侧上下相邻的两个循环移位单位阵 $\mathbf{I}(p_{j,l})$ 、 $\mathbf{I}(p_{j+1,l})$ 对应的移位值分别为 $p_{j,l}$ 、 $p_{j+1,l}$, 则要消除其与右侧准对角矩阵的 girth-4 环,必须满足

$$p_{j,l} - p_{j+1,l} \neq 1 \pmod{B} \quad (10)$$

参考定理 1 的证明方法^[3]。

结合上述条件,完全消除联合校验矩阵中的 Type-I 和 Type-II girth-4 环,应同时满足定理 1 与定理 2。

3 系统性能分析

本节分析面向能量收集的 RA 编码协作系统的中断概率及误码性能。

3.1 中断概率分析

假定 h_{SR} 、 h_{SD} 、 h_{RD} 分别对应于 S-R、S-D、R-D 信道,信源节点以功率 P 发送调制后的码字 x 。其中协作中继用于信息译码消耗的功率为 αP , α 为功率分配因子,将接收信号分配给信息译码与收集能量。其取值决定于信源节点发送功

率 P 、S-R 信道条件。若 P 越大, S-R 信道条件越好, 则 α 取值可越小, 协作中继收集到的能量越多。协作中继收集到的能量

$$P^{EH} = |h_{SR}|^2(1-\alpha)P \quad (11)$$

假设协作中继的能量利用率为 η , 则协作中继用来发送再次编码得到的信息 \bar{x} 的功率为

$$\bar{P} = |h_{SR}|^2\eta(1-\alpha)P \quad (12)$$

目的节点接收到来自信源节点与协作中继的信号 r_{SD} 与 r_{RD} 分别如下

$$r_{SD} = \frac{h_{SD}\sqrt{P}x}{d_{SD}} + n_D \quad (13)$$

$$r_{RD} = \frac{h_{RD}\sqrt{\bar{P}}\bar{x}}{d_{RD}} + n_D =$$

$$\frac{h_{RD}\sqrt{|h_{SR}|^2\eta(1-\alpha)P}x}{d_{RD}} + n_D \quad (14)$$

式中, n_D 为协作系统目的节点 D 的加性噪声, 服从复高斯分布 $n_D \sim CN(0, \sigma_D^2)$ 。S-D 信道与 R-D 信道传输距离不同, 分别用 d_{SD}^2 、 d_{RD}^2 表示 S-D 信道、R-D 信道由于距离带来的功率衰减。

由于目的节点对信源节点的信号与协作中继的信号进行联合处理^[4], 对编码协作系统而言, 瞬时信道容量计算如下

$$C = \frac{N}{N+M_2}\log_2\left(1 + \frac{|h_{SD}|^2P}{d_{SD}^2\sigma_D^2}\right) + \frac{M_2}{N+M_2}\log_2\left(1 + \frac{|h_{RD}|^2|h_{SR}|^2\eta(1-\alpha)P}{d_{RD}^2\sigma_D^2}\right) \quad (15)$$

预定信息传输速率为 $r = (N - M_1)/(N + M_2)$ 。与编码过程对应, N 为信源节点信号对应的码长, 其中 M_1 为其对应的校验位长; M_2 为协作中继信号对应的校验位长。系统中断概率为

$$P_{out} = \Pr\{C < r\} = \Pr\left\{\frac{N}{N+M_2}\log_2\left(1 + \frac{|h_{SD}|^2P}{d_{SD}^2\sigma_D^2}\right) + \frac{M_2}{N+M_2}\log_2\left(1 + \frac{|h_{RD}|^2|h_{SR}|^2\eta(1-\alpha)P}{d_{RD}^2\sigma_D^2}\right) < r\right\} \quad (16)$$

当 $N = M_2$ 时, 则

$$P_{out} = \Pr\left\{\frac{1}{2}\log_2\left[\left(1 + \frac{|h_{SD}|^2P}{d_{SD}^2\sigma_D^2}\right) \cdot \left(1 + \frac{|h_{RD}|^2|h_{SR}|^2\eta(1-\alpha)P}{d_{RD}^2\sigma_D^2}\right)\right] < r\right\} \quad (17)$$

S-R、S-D、R-D 为相互独立的瑞利信道, 且 $|h_{SR}|^2$ 、 $|h_{SD}|^2$ 、 $|h_{RD}|^2 \sim \varepsilon(1)$ 即服从参数为 1 的指数分布。不易得出式(18)的闭合解, 在下一节将通过数值仿真进一步分析中断概率。

3.2 误码性能分析

目的节点对复合码字用联合迭代译码^[4], 该译码方式基于与式(8)对应的联合 Tanner 图, 实现了每次迭代过程

中外信息的充分互换。由于来自信源节点的信号与来自协作中继的信号经历的衰落信道是相互独立的, 从式(16)中断概率分析也可看出, 本文提出的面向能量收集的编码协作系统能获得分集增益, 提高系统可靠性。

同时, 本文对信源节点和协作中继采用的 RA 码进行了联合设计, 消除了对应于编码协作系统的联合校验矩阵中 Type-I 和 Type-II 两种 girth-4 环。短环是影响 RA 码的一个非常重要的因素, 通过消除所有短环, 该系统获得更高的编码增益。

故本文提出的面向能量收集的 RA 编码协作系统, 既能获得由于协作带来的高分集增益, 同时又能获得由于采用联合设计的 RA 码而带来的高编码增益, 系统中断概率与误码性能得到极大提升。

4 仿真结果

本节通过数值模拟研究面向能量收集的 RA 编码协作系统性能。S-D、S-R 和 R-D 信道为瑞利块衰落信道, 且相互独立, 信道衰落系数在每个码字持续时间内保持不变。目的节点完全知道信道状态信息, 且对来自 S 与 R 的信号采用联合迭代译码算法译码。系统信噪比 SNR 定义为信号发送功率 P 与加性噪声功率 σ_D^2 的比值。系统采用的 RA 码见表 1。

表 1 系统采用的联合设计 RA 码与随机 LDPC 码¹⁾

Table 1 Joint designed RA codes and LDPC codes employed by the systems

码	信源节点(S)	协作中继(R)
联合设计的 RA 码	$H_1 = [A_{200 \times 200} \quad D_{200 \times 200}]$ $B = 50$	$H_2 = [B_{200 \times 200} \quad D_{200 \times 200}]$ $B = 50$
随机 LDPC 码	码率 $r_1 = 1/2$, 码长 $N_1 = 400$ $d_v = 3, d_c = 6$	码率 $r_2 = 2/3$, 码长 $N_2 = 600$ $\tilde{d}_v = 3, \tilde{d}_c = 9$

注: 1) d_v, \tilde{d}_v 为校验矩阵每列中 1 的个数; d_c, \tilde{d}_c 为校验矩阵每行中 1 的个数。

4.1 面向能量收集的编码协作系统中断概率性能

研究面向能量收集的编码协作系统在瑞利块衰落信道条件下的中断概率性能。系统信息传输速率 $r = 1/3$, $d_{SD} = 2d_{RD} = 2$ 。

图 3 比较了点对点系统以及不同条件下的面向能量收集的编码协作系统的中断概率性能。可以看出, 与点对点系统比较, 本文所提方案大大降低了系统的中断概率, 并获得了更高的分集度。如在 SNR = 20 dB 时, 点对点系统的中断概率约为 10^{-2} , 但是本文所提方案系统的中断概率降到了约 10^{-3} 。图 3 同时表明, 相同条件下功率分配因子 α 越大, 协作中继用于译码消耗的功率越大, 则系统的中断概率性能越差, 如当 $\eta = 1, \alpha = 0.5$ 时系统的中断概率大于 $\alpha = 0$ 时。图 3 还表明系统的能量利用率 η 越高, 系统的中断概率性能越好, 如当 $\alpha = 0.5, \eta = 1$ 时系统的中断概率小于 $\eta = 0.5$ 时的中断概率。

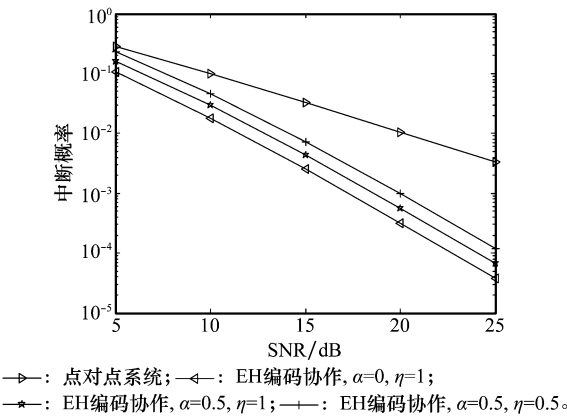


图 3 面向能量收集的编码协作与点对点系统中断概率比较
Fig. 3 Outage probability comparison of energy-harvesting-based coded cooperation and point to point system

4.2 采用联合设计 RA 码的面向能量收集的编码协作系统误码率性能

通过仿真研究采用联合设计 RA 码的面向能量收集的编码协作系统误码率 (bit error rate, BER) 性能,联合设计的 RA 码消除了所有 Type-I 和 Type-II girth-4 环。信源节点和协作中继采用的 RA 码与随机 LDPC 码见表 1,目的节点的复合码长均为 600,等效码率^[16]同为 1/3。

当 $d_{SD} = 2d_{RD} = 2, \alpha = 0, \eta = 1$,图 4 比较了迭代次数为 1 和 10 时,采用联合设计 RA 码和采用随机 LDPC 码时系统的 BER 性能。可以看出,迭代次数为 1 时,它们的 BER 性能差别不大,因为在该条件下,联合迭代译码算法中外信息并没有交换,只利用了信道信息,所以没有体现 girth-4 环的消除优势。当迭代次数增大到 10,采用联合设计 RA 码系统的 BER 性能明显优于随机 LDPC 码,因为联合设计 RA 码中没有任何 girth-4 环,所有的 Type-I 和 Type-II girth-4 环都被消除了。仿真结果验证了面向能量收集的编码协作系统中联合设计 RA 码的优势。

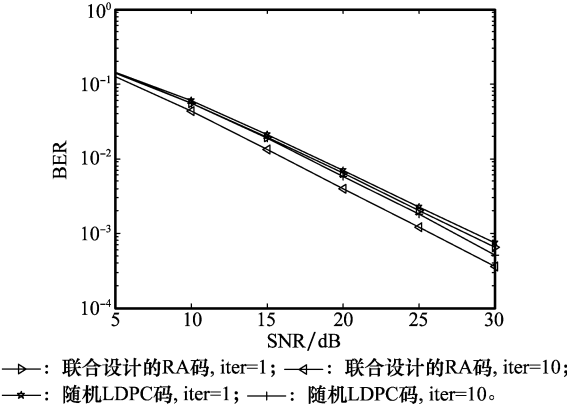


图 4 采用联合设计 RA 码系统与采用随机 LDPC 码系统的 BER 比较
Fig. 4 BER comparison of systems with jointly designed RA codes and random LDPC codes

4.3 不同 α, η 面向能量收集的 RA 编码协作系统 BER 性能

研究面向能量收集的 RA 编码协作系统功率分配因子 α 、能量利用率 η 对误码性能的影响。信源节点与协作中继采用的码字与第 5.2 节相同,迭代次数为 10, $d_{SD} = 2d_{RD} = 2$ 。图 5 比较了不同 α, η 时系统的 BER 性能。可以看出,当 $\alpha = 0, \eta = 1$,即 S-R 是理想无噪信道,协作中继将所有 RF 信号收集能量用于协作发送信息,且协作中继的能量利用率为 100% 时,系统的 BER 最小;而当 $\alpha = 0.5, \eta = 0.5$ 时,系统的 BER 最大,即误码性能最差。协作中继信息译码分配的功率越少、能量利用率越高,则面向能量收集的 RA 编码协作系统 BER 性能越优异。

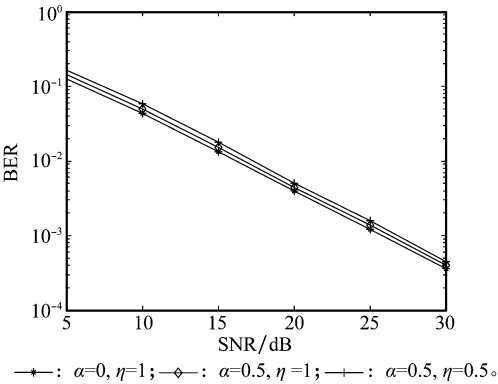


图 5 不同 α, η 条件下面向能量收集的 RA 编码协作系统 BER 比较
Fig. 5 BER comparison of energy-harvesting-based RA-coded cooperation with various α, η at the relay

5 结 论

本文提出了面向能量收集的 RA 编码协作系统,协作中继从信源源节点发出的射频信号中收集能量,无需外部电源供给,故能够突破协作中继节点的能量制约,提升系统的能量使用效率与生存时间。推导出了对应于信源节点与协作中继采用的 RA 码的联合校验矩阵,并联合设计该矩阵,消除了所有 girth-4 环。理论分析和数值仿真表明,与传统点对点系统相比,本文所提方案大大降低了系统的中断概率。数值仿真表明,采用联合设计的 RA 码的系统性能优于采用随机 LDPC 码;仿真结果同时表明,协作中继信息译码分配的功率越少、能量利用率越高,则系统性能越优异。

参考文献:

[1] Bao X K. Wireless user cooperation strategies, coding schemes, and applications[D]. Lehigh University, 2009.
[2] Gallager R G. Low density parity check codes[M]. Cambridge, Mass., MIT Press, 1963.
[3] Fossorier M P C. Quasi-cyclic low-density parity-check codes from circulant permutation matrices[J]. IEEE Trans. on Information Theory, 2004, 50(8): 1788-1793.
[4] Zhang S W, Yang F F, Tang L, et al. LDPC-coded cooperation with receive multi-antenna and unknown CSI in the destination[J]. Wire-

- less Personal Communications, 2013, 7(24):2685 – 2703.
- [5] Chakrabarti A, Baynast D, Sabharwal A. Low density parity check codes for the relay channel[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, 25(2): 280 – 291.
- [6] Chen Z Q, Ouyang S, Xiao H L. Cooperative LDPC codes design for decode-and-forward half-duplex relay channels [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(11):2610 – 2615. (陈紫强, 欧阳缮, 肖海林. 解码前传半双工中继信道下协作 LDPC 码设计[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(11):2610 – 2615.)
- [7] Varshney L R. Transporting information and energy simultaneously[C]// *Proc. of the IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, 2008:1612 – 1616.
- [8] Ding Z G, Zhong C J, Ng D W K, et al. Application of smart antenna technologies in simultaneous wireless information and power transfer[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(4): 86 – 93.
- [9] Zhang H Y, Huang Y M, Yang L X. Beamforming design based on energy harvesting proportional fairness in a simultaneous wireless information and power transfer system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(2):391 – 400. (张海洋, 黄永明, 杨绿溪. 无线携能通信系统中基于能量获取比例公平的波束成形设计[J]. 物理学报, 2015, 64(2):391 – 400.)
- [10] Nasir A A, Zhou X Y, Durrani S, et al. Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing[J]. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2013, 12(7):3622 – 3636.
- [11] Chalise B K, Ma W K, Zhang Y M D, et al. Optimum performance boundaries of OSTBC based AF-MIMO relay system with energy harvesting receiver[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2013, 61(17):4199 – 4213.
- [12] Lee S, Liu L, Zhang R. Collaborative wireless energy and information transfer in interference channel[J]. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2015, 14(1):545 – 557.
- [13] Gurakan B, Ozel O, Yang J, et al. Energy cooperation in energy harvesting communications[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2013, 61(12):4884 – 4898.
- [14] Kashef M, Ephremides A. Optimal partial relaying for energy-harvesting wireless networks[J]. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2016, 24(1):113 – 122.
- [15] Du G Y, Xiong K, Qiu Z D. Outage performance of multiuser transmission network with energy harvesting cooperative relay[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2015, 45(3):979 – 984. (杜冠瑶, 熊轲, 裴正定. 基于能量收集的协作中继传输性能分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(3):979 – 984.)
- [16] Zhang S W, Yang F F, Tang L. Network-coding-based multi-source multirelay LDPC-coded cooperative MIMO[J]. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2015, 16(3):491 – 502.

作者简介:

张顺外(1987 –), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为编码协作网络。

E-mail:swzhang@njupt.edu.cn

仰枫帆(1966 –), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为数字通信。

E-mail:yffee@nuaa.edu.cn

宋荣方(1964 –), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为无线通信理论与技术。

E-mail:songrf@njupt.edu.cn