

# 基于 SWIPT 的 Polar 编码协作码的设计与系统性能研究

夏子寒<sup>1</sup> 张顺外<sup>1,2</sup>

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏南京 210003;

2. 南京邮电大学宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室, 江苏南京 210003)

**摘要:** 极化(Polar)编码协作可同时获得编码增益与分集增益,实现可靠通信。为了解决中继能量受限问题,本文研究了基于无线信息与能量同传(Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT)技术的 Polar 编码协作系统。首先,建立了基于 SWIPT 的 Polar 编码协作系统模型。其次,鉴于 Polar 码的 Plotkin 构造方法将一个长码分裂成两个短码,非常适用于编码协作场景,使用 Plotkin 构造方法联合设计信源节点和中继节点 Polar 码,并在目的节点对其进行联合串行相消(Successive Cancellation, SC)译码。相比传统点对点系统,基于 SWIPT 的 Polar 编码协作系统使得系统中断概率大幅度降低;与随机低密度奇偶校验(Low Density Parity Check, LDPC)编码协作系统相比,在译码迭代次数低时所提方案误码性能更佳。

**关键词:** 无线信息与能量同传; 编码协作; Polar 码; Plotkin 构造

**中图分类号:** TN911.22 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16798/j.issn.1003-0530.2022.05.017

**引用格式:** 夏子寒,张顺外. 基于 SWIPT 的 Polar 编码协作码的设计与系统性能研究[J]. 信号处理,2022,38(5): 1047-1055. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2022.05.017.

**Reference format:** XIA Zihan, ZHANG Shunwai. Research on code design and performance analysis of Polar coded cooperation based on SWIPT technology [J]. Journal of Signal Processing, 2022, 38(5): 1047-1055. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2022.05.017.

## Research on Code Design and Performance Analysis of Polar Coded Cooperation Based on SWIPT Technology

XIA Zihan<sup>1</sup> ZHANG Shunwai<sup>1,2</sup>

(1. College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China; 2. Key Lab of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology (Nanjing University of Posts and Telecommunications), Ministry of Education, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

**Abstract:** Polar coded cooperation can obtain both coding gain and diversity gain to achieve reliable communication. In order to solve the problem of energy limitation of the relay, this paper studies the Polar coded cooperation based on simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) technology. Firstly, the model of Polar coded cooperation based on SWIPT is established. Secondly, in the Plotkin construction method of Polar code, a long code is split into two short codes, which is very suitable for coded cooperation scenarios. Therefore, the Plotkin construction method is used to jointly design the Polar codes employed by the source and relay, and the joint successive cancellation (SC) decoding is performed at the destination.

收稿日期: 2021-06-17; 修回日期: 2021-11-11

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究项目(20KJB510034);南京邮电大学宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室开放研究基金(JZNY202112);南京邮电大学国自基金孵化项目(NY219073)

Compared with the traditional point-to-point system, the Polar coded cooperation based on SWIPT greatly reduces the system outage probability. Compared with the low density parity check (LDPC) coded cooperation based on SWIPT, the proposed scheme can achieve better bit error rate (BER) performance when the number of decoding iterations is small.

**Key words:** simultaneous wireless information and power transfer technology; coded cooperation; Polar code; Plotkin construction

## 1 引言

协作通信技术最早由 Sendonaris 等人提出<sup>[1-2]</sup>, 利用不同用户之间的天线获得类似于多输入多输出 (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 系统的性能增益。文献[3]研究了瑞利信道下各协作通信协议。编码协作<sup>[4]</sup>结合信道编码和协作通信, 可以兼得编码增益和协作的好处, 使得协作性能进一步提升。基于低密度奇偶校验 (Low Density Parity Check, LDPC)<sup>[5]</sup>, 文献[6]研究了网络编码的 LDPC 编码协作系统, 并采用了多信源多中继的系统模型。文献[7]结合 Turbo 码与协作技术, 提出了只选择较可靠中继参与协作的编码协作系统。极化 (Polar) 码是目前发现的唯一一类在理论上能够到达香农限的编码方法, 其递归的编译码结构降低了硬件资源在共享和控制上的复杂度, 信道极化是 Polar 码的关键<sup>[8-9]</sup>, 即利用极化出来的无噪信道传输有用信息, 全噪信道用来传输冻结信息或不传信息。文献[10]研究 Polar 编码协作系统, 使用两个短码构造一个长码, 在目的节点通过划分协作方式构建 Polar 码并对其联合译码, 验证了其误码性能优于 (Reed-Muller, RM) 码的编码协作方案。

由于中继节点的能量供给可能会受到限制, 影响整个通信系统的可靠性, 从而能量收集 (Energy Harvesting, EH) 技术<sup>[11-13]</sup> 受到人们越来越多的关注。正是因为 EH 技术利用射频 (Radio Frequency, RF) 信号可以实现信息的传输与能量的收集, 故又称为无线信息与能量同传 (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT) 技术<sup>[14-16]</sup>。与传统的 EH 技术不同的是, SWIPT 技术设计面临一个十分重要的问题, 即如何平衡 EH 和信息译码, 从而获得最大收益。文献[17]提出了时间切换 (Time Switching, TS) 接收机和功率分割 (Power Splitting, PS) 接收机, 中继节点分别参照 TS 协议和 PS 协议来平衡能量收集和信息处理。随着 5G 技术的发展, “绿色通信”已经成为了未来信息通信技术发展的方向之一, SWIPT 技术和各种前沿技术逐渐

相结合。文献[18]将 SWIPT 技术与非正交多址接入 (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) 技术结合, 提出一种节能网络模型, 其中基站采用自适应定向天线, 信号通过 NOMA 传输, 节点使用 SWIPT 和 PS 获取数据和能量。文献[19]研究了 SWIPT 条件下 MIMO 系统能效和算法优化问题。在将 SWIPT 技术与协作技术结合的道路上, 不少学者取得的十分有价值的成果。文献[20]研究了放大转发方式下, 基于 TS 协议和 PS 协议的协作系统吞吐量性能, 分别推导了时延受限和时延容忍传输模式下系统中断概率的解析表达式。文献[21]研究了基于 SWIPT 的译码转发中继协作的中断概率, 在中继节点受到同信道干扰下, 推导出基于 PS 协议的中断概率的闭合渐近式, 并得到最优功率分割因子。文献[22]将 SWIPT 与编码协作结合, 研究了面向能量收集的重复累积 (Repeat-Accumulate, RA) 编码协作, 推导出信源节点和中继节点采用的联合校验矩阵, 并消除该矩阵中所有 girth-4 环。目前, 尚未有文献针对基于 SWIPT 技术的 Polar 编码协作系统展开研究。

鉴于 Polar 编码协作的优点, 本文结合 SWIPT 技术与 Polar 编码协作, 提出基于 SWIPT 的 Polar 编码协作系统, 并通过理论分析与数值仿真对其中断概率和误码率 (Bit Error Rate) 性能展开研究。本文主要贡献如下: (1) 首先建立基于 SWIPT 的 Polar 编码协作系统模型, 在实现可靠通信的同时, 解决了中继节点能量受限问题。(2) 采用 Plotkin 构造方法在信源节点和中继节点联合设计 Polar 码, 并在目的节点实现联合译码。(3) 推导出系统中断概率表达式并分析其 BER 性能, 并进一步通过数值仿真验证了所提系统的优越性。

## 2 基于 SWIPT 的 Polar 编码协作系统模型

图 1 为基于 SWIPT 的 Polar 编码协作系统模型。信源节点 S 和中继节点 R 向目的节点 D 传输信息。其中 S 和 D 由不受限的外部电源供电, R 由有限能量的电池供电, 为了发送信息至 D, R 需要从 S 发送过来的射频信号中额外地收集能量。

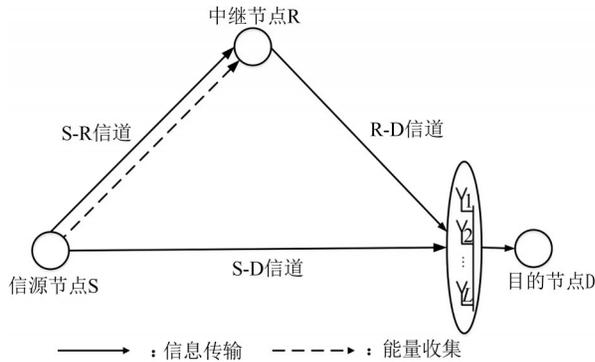


图 1 基于 SWIPT 的 Polar 编码协作系统

Fig. 1 Polar coded cooperation based on SWIPT

在 S 处, 信息比特经过 Polar 码编码器生成码字, 调制后发送给 R 和 D。R 将接收到的一部分信号用来译码, 将另一部分信号能量收集起来, 用于传输信息至 D。

在 R 处, R 利用接收到的信号能量一部分用于译码, 另一部分用于给 D 发送信息。恢复后的原始信息通过比特筛选器, 做比特筛选后进行 Polar 编码, 编码后的码字与 R 译码恢复的原始信息进行模 2 加, R 最后利用收集到的能量将模 2 加后的码字经 R-D 信道发送至 D。

在 D 处, 通过多天线接收来自 S 和 R 的信息, 并通过最大比合并 (Maximal Ratio Combining, MRC) 方法将接收到的来自 S 处和 R 处的信息分别合并, 再将合并后的两段码字级联进行联合 SC 译码。

### 3 编码协作系统基于 Plotkin 构造方法联合设计 Polar 码

基于 Plotkin 构造方法联合设计 Polar 码示意图如图 2 所示。本节先简要介绍 Polar 码的 Plotkin 构造

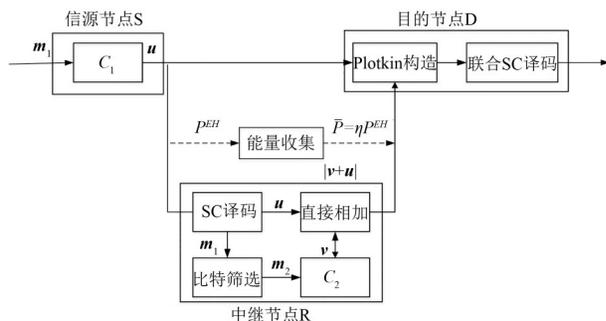


图 2 基于 Plotkin 构造方法联合设计 Polar 码示意图

Fig. 2 Diagram of joint design of Polar code based on Plotkin construction

造, 然后重点研究基于 SWIPT 的 Polar 编码协作系统码的设计。

#### 3.1 基于 Plotkin 构造 Polar 码

本小节介绍 Plotkin 构造方法构造 Polar 码。

文献[23]所采用的传统 Plotkin 构造方法如下:

给定两个线性分组码  $C_1(N_1, K_1, d_1)$  和  $C_2(N_2, K_2, d_2)$ , 其码长  $N_1 = N_2$ , 信息位长度分别为  $K_1$  和  $K_2$ , 最小距离分别为  $d_1$  和  $d_2$ 。Plotkin 构造方法将这两个线性分组码联合设计成一个长度为  $N = 2N_1$  的新线性分组码  $C$ 。数学上表示为:

$$C = \left[ C_1 \mid C_1 + C_2 \right] = \{v + ul \mid u \in C_1, v \in C_2\} \quad (1)$$

其中求和为模 2 加。

Polar 码的 Plotkin 构造不同于传统的 Plotkin 构造。在传统 Plotkin 构造中, 两个短码构造一个长码, 而在 Plotkin 构造 Polar 码中, 一个长 Polar 码产生两个短 Polar 码, 它们在目的节点重构长 Polar 码。Polar 码的 Plotkin 构造矩阵如下:

$$G = \begin{bmatrix} G_2 & 0 \\ G_1 & G_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中  $G_1, G_2$  和  $G$  分别是  $C_1, C_2$  和  $C$  的生成矩阵。矩阵  $G$  是  $F^{\otimes m}$  去除  $D^c$  对应的行后的形式, 其中  $F^{\otimes m}$  为矩阵  $F \triangleq \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$  的  $m$  阶 Kronecker 积,  $m = \log_2 N, D$  和  $D^c$  分别代表了  $F^{\otimes m}$  中信息位和冻结位所对应的行。

下面是非系统 Polar 码 Plotkin 构造步骤:

- 1) 设置系统整体码长  $N = 2^m$  与整体码率  $R$ 。
- 2) 生成 Polar 码编码矩阵  $G' = F^{\otimes m}$ 。
- 3) 通过对称容量或巴氏参数得到该码字的信息位和冻结位, 进一步确定  $G'$  中  $D$  和  $D^c$  所对应的行。
- 4) 删除  $G'$  中除  $D$  之外的所有行, 以获得矩阵  $G$ 。
- 5) 找出  $G$  中从  $N/2 + 1$  列到  $N$  列全零的行并堆叠在  $G$  的顶部, 这些行的数量计为  $K_2$ 。
- 6) 按照式(2)所示构造矩阵从矩阵  $G$  中提取矩阵  $G_1$  和  $G_2$ , 其中  $G_1$  大小为  $K_1 \times N_1, G_2$  大小为  $K_2 \times N_2$ 。

#### 3.2 基于 Plotkin 构造方法联合设计 Polar 码

假设  $h_{SR}, h_{SD}, h_{RD}$  分别对应 S-R、S-D、R-D 信道, 信源节点 S 发送功率为  $P$ , 中继节点 R 功率分配因

子为  $\alpha$ , 故用于译码的功率为  $\alpha P$ , 用于信息发送的功率则为  $(1 - \alpha)P$ 。  $d_{SD}^2, d_{RD}^2$  分别表示 S-D、R-D 距离导致的功率衰减。

### 3.2.1 信源节点 Polar 码设计

信源节点 S 生成信息  $\mathbf{m}_1$ , 并通过参数为  $(N_1, K_1, d_1)$  的 Polar 码  $\mathbf{C}_1$  对  $\mathbf{m}_1$  进行编码以获得的长度为  $N_1$  的  $\mathbf{u}$ 。

### 3.2.2 中继节点 Polar 码设计

中继节点 R 的结构如图 2 中继节点 R 所示, 假定 S 发送信号为  $x_s$ , R 接收到的信号  $y_{SR}$  为:

$$y_{SR} = h_{SR}x_s + n_R \quad (3)$$

其中是信源节点 S 处二进制相移键控 (Binary Phase Shift Keying, BPSK) 调制后得到的信号,  $n_R$  是 R 处的加性噪声, 服从复高斯分布  $n_R \sim CN(0, \sigma_R^2)$ 。

R 收集到的功率为:

$$P^{EH} = |h_{SR}|^2(1 - \alpha)P \quad (4)$$

R 的能量利用率为  $\eta$ , 则 R 用来将再次编码得到的信息传输至 D 的功率为:

$$\bar{P} = |h_{SR}|^2\eta(1 - \alpha)P \quad (5)$$

R 处对来自 S 处的码字译码, 得到  $\mathbf{u}$ , 其信息位长度为  $K_1$ 。  $\mathbf{m}_2$  为  $\mathbf{m}_1$  比特筛选后得到的码字, 其信息位  $K_2$  需要保证只能从  $K_1$  中选择, 因为在  $K_1$  中被选择的信息位对称容量值较低, 巴氏参数值较高。需要注意的是, 任何小于  $K_2$  的信息比特的选择将导致目的节点 D 处 SC 译码已知的冻结比特增加, 进一步导致 BER 性能改善。当  $K_2 = 0$  时, 由于  $\mathbf{m}_2$  为全 0 的全冻结位码字, 故 R 处可以简化为只处理并得到  $\mathbf{m}_1$ , 此时  $\mathbf{x} = \mathbf{m}_1$ , 再将  $\mathbf{x}$  发送至 D, 此时的误码率性能最优。

然后, 通过参数为  $(N_2, K_2, d_2)$  的 Polar 码  $\mathbf{C}_2$  对  $\mathbf{m}_2$  进行编码以获得的长度为  $N_2$  的码字  $\mathbf{v}$ 。接着, 将  $\mathbf{v}$  和  $\mathbf{u}$  直接求和, 即  $\mathbf{v} + \mathbf{u}$ 。

### 3.2.3 目的节点联合处理

S-D 信道和 R-D 信道为相互独立的瑞利衰落信道, 目的节点 D 配置  $L$  根天线, D 处第  $i$  根天线接收到来自信源节点 S 的信号表示为:

$$y_{SD}^i = \frac{h_{SD}^i\sqrt{P}x_s}{d_{SD}} + n_D \quad (6)$$

接收到来自中继节点 R 的信号表示为:

$$y_{RD}^i = \frac{h_{RD}^i\sqrt{\bar{P}}x_R}{d_{RD}} + n_D = \frac{h_{RD}^i\sqrt{|h_{SR}|^2\eta(1 - \alpha)P}x_R}{d_{RD}} + n_D \quad (7)$$

其中  $i \in (1, 2, \dots, L)$ , 其中  $x_R$  是 R 处 BPSK 调制后得到的信号,  $n_D$  是 D 处的加性噪声, 服从复高斯分布  $n_D \sim CN(0, \sigma_D^2)$ 。 D 处采用 MRC 合并各天线接收信号时, 得到:

$$y_{SD} = \sum_{i=1}^L (h_{SD}^i \cdot y_{SD}^i) \quad (8)$$

$$y_{RD} = \sum_{i=1}^L (h_{RD}^i \cdot y_{RD}^i) \quad (9)$$

用  $\mathbf{y}_{RD}$  表示 D 接收来自 R 的对应于码字  $\mathbf{v} + \hat{\mathbf{u}}$  的信号,  $\mathbf{y}_{SD}$  表示 D 接收来自 S 的对应于码字  $\mathbf{u}$  的信号, 级联  $\mathbf{y}_{RD}$  与  $\mathbf{y}_{SD}$  后输入 SC 译码器的码字为  $[\mathbf{y}_{RD}, \mathbf{y}_{SD}]$ 。级联后输入 SC 译码器的码字为  $[\mathbf{y}_{RD}, \mathbf{y}_{SD}]$ 。

D 处采用联合串行相消 (Successive Cancellation, SC) 译码器会对  $[\mathbf{y}_{RD}, \mathbf{y}_{SD}]$  进行联合 SC 译码, 通过计算对数似然比 (Log Likelihood Ratio, LLR) 生成对信源处信息的估计  $\tilde{m}_j$ :

$$L_N([\mathbf{y}_{RD}, \mathbf{y}_{SD}], \tilde{m}_1^{j-1}) = \log \left( \frac{W_N^j([\mathbf{y}_{RD}, \mathbf{y}_{SD}], \tilde{m}_1^{j-1}|0)}{W_N^j([\mathbf{y}_{RD}, \mathbf{y}_{SD}], \tilde{m}_1^{j-1}|1)} \right) \quad (10)$$

$$\tilde{m}_j = \begin{cases} 0, & \text{if } L_N([\mathbf{y}_{RD}, \mathbf{y}_{SD}], \tilde{m}_j) \geq 0 \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

其中  $W_N^j$  为序号为  $j$  的极化信道的转移概率,  $j \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。联合译码完成后, 我们通过提取后  $N_1$  位得到信源节点信息位的估计。

## 4 系统性能分析

本节分析基于 SWIPT 的 Polar 编码协作系统中中断概率和误码性能。首先, 我们对分析非协作系统和文章所提系统的中断概率。

非协作系统瞬时信道容量为:

$$C_{\text{Noncoop}} = \log_2 \left( 1 + \sum_{i=1}^L |h_i|^2 \gamma \right) \quad (12)$$

$L$  为 D 处接收天线数, 所有天线具有相同的每比特平均接收信噪比 (Signal-Noise Ratio, SNR)  $\gamma$ 。则其中断概率为

$$\Pr_{\text{Noncoop}} = \Pr\left(\log_2\left(1 + \sum_{i=1}^L |h_i|^2 \gamma\right) < r\right) = \Pr\left(\sum_{i=1}^L |h_i|^2 < \frac{2^r - 1}{\gamma}\right) \quad (13)$$

$r$ 为假定的信息速率。 $|h_i|^2$ 服从指数分布 $|h_i|^2 \sim \varepsilon(1)$ 。

故 $X = \sum_{i=1}^L |h_i|^2$ 服从以下分布

$$f_x(x) = \begin{cases} \frac{x^{L-1}}{(L-1)!} e^{-x}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

式(13)计算为:

$$\Pr_{\text{Noncoop}} = \int_0^{\frac{2^r - 1}{\gamma}} \frac{x^{L-1}}{(L-1)!} e^{-x} dx \quad (15)$$

本文所提系统瞬时信道容量计算为:

$$C_{\text{Coop}} = \frac{1}{2} \log_2\left(1 + \sum_{i=1}^L |h_{SD}^i|^2 \gamma^{(1)}\right) + \frac{1}{2} \log_2\left(1 + |h_{SR}|^2 \sum_{i=1}^L |h_{RD}^i|^2 \gamma^{(2)}\right) \quad (16)$$

$\gamma^{(1)}$ 、 $\gamma^{(2)}$ 分别为S-D和R-D信道每比特每天线平均信噪比, $\gamma^{(1)} = \frac{P}{d_{SD}^2 \sigma_D^2}$ ,  $\gamma^{(2)} = \frac{\eta(1-\alpha)P}{d_{RD}^2 \sigma_D^2}$ 。

故对S而言,本文所提系统中断概率为:

$$\Pr_{\text{Coop}} = \Pr\left(\left(\frac{1}{2} \log_2\left(1 + \sum_{i=1}^L |h_{SD}^i|^2 \gamma^{(1)}\right) + \frac{1}{2} \log_2\left(1 + |h_{SR}|^2 \sum_{i=1}^L |h_{RD}^i|^2 \gamma^{(2)}\right)\right) < r\right) \quad (17)$$

在所提方案中,由于S-D和R-D是相互独立的衰落信道,且从式(17)也可以看出,本文提出的基于SWIPT的编码协作系统能获得分集增益,使得系统可靠性提高。同时,D处采用的多天线接收进一步提高空间分集增益。

能量效率指消耗单位能量成功传输的信息比特数,定义为:

$$\xi = \frac{C}{\beta P + P_c} \quad (18)$$

其中, $\beta \in [1, \infty)$ 为功率放大器效率的倒数, $P_c$ 指恒定的硬件电路功耗,与信息传输无关。由式(12)可以推出非协作系统能量效率为:

$$EE_{\text{Noncoop}} = \frac{C_{\text{Noncoop}}}{\beta P + P_c} = \frac{\log_2\left(1 + \sum_{i=1}^L |h_i|^2 \gamma\right)}{\beta P + P_c} \quad (19)$$

由式(16)可以推出本文所提系统能量效率为:

$$EE_{\text{Coop}} = \frac{C_{\text{Coop}}}{\beta P + P_c} = \frac{\frac{1}{2} \log_2\left(1 + \sum_{i=1}^L |h_{SD}^i|^2 \gamma^{(1)}\right) + \frac{1}{2} \log_2\left(1 + |h_{SR}|^2 \sum_{i=1}^L |h_{RD}^i|^2 \gamma^{(2)}\right)}{\beta P + P_c} \quad (20)$$

在5.1节中仿真验证在相同条件下,本文所提协作系统中断概率小于非协作系统,即协作系统统计 $C_{\text{Coop}}$ 大于 $C_{\text{Noncoop}}$ 。协作系统中,中继节点R仅利用收集到的能量发送信号,无需消耗额外的发送功率,协作与非协作系统消耗总功率相等,故本文所提协作系统能量效率高于非协作系统。

## 5 仿真结果

本节通过仿真分析基于SWIPT的Polar编码协作系统性能。S-R、S-D、R-D为相互独立的瑞利衰落信道。目的节点D对来自信源节点S和中继节点R的码字采用联合SC译码。信源节点S与中继节点R采用的Polar码见表1。

表1 系统采用Plotkin构造的Polar码

Tab. 1 The system uses Polar codes constructed by Plotkin

信源节点(S)	中继节点(R)
码率 $r_1 = 1/2$	码率 $r_2 = 3/8$
码长 $N_1 = 128$	码长 $N_2 = 128$

### 5.1 基于SWIPT的Polar编码协作系统中断概率性能

我们比较基于SWIPT的Polar编码协作系统和非协作系统的中断概率性能。系统信息传输速率 $r = 1/4$ ,  $d_{SD} = 2d_{RD} = 2$ 。

图3比较了本文所提系统与非协作系统在目的节点配置 $L = 2, 3, 4$ 根天线时的中断概率性能,其中功率分配因子 $\alpha = 0.5$ ,能量利用率 $\eta = 1$ ,编码协作与非协作系统的信息传输速率都保持 $r = 1/4$ 。仿真图显示天线数相同时,基于SWIPT的Polar编码协作系统的中断概率较非协作系统降低。如天线数为2,SNR为10 dB时,非协作系统的中断概率约为 $3 \times 10^{-3}$ ,但本文所提方案系统的中断概率降至约 $3 \times 10^{-4}$ 。

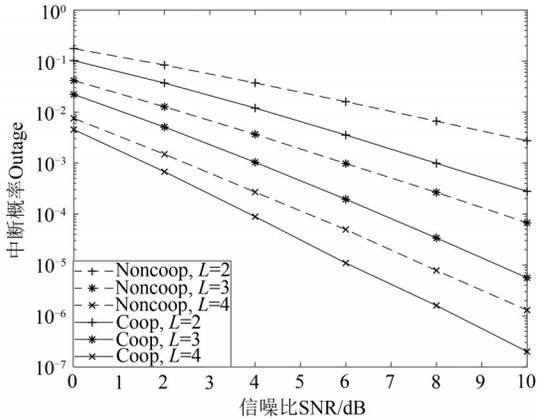


图3 基于SWIPT的Polar编码协作系统与非协作系统的中断概率比较

Fig. 3 Comparison of the outage probability of Polar coded cooperation based on SWIPT and Polar coded non-cooperation

## 5.2 不同 $\alpha$ 条件下基于SWIPT的Polar编码协作系统中断概率性能

图4比较系统天线数为3,信息传输速率 $r = 1/4$ , $d_{SD} = 2d_{RD} = 2$ ,不同功率分配因子 $\alpha$ 下基于SWIPT的Polar编码协作系统中断概率性能。可以看出,相同条件下功率分配因子 $\alpha$ 和系统中断概率成正比关系。如当 $\alpha = 0.8$ 时系统的中断概率大于 $\alpha = 0.5$ 时的中断概率, $\alpha = 0.2$ 时的中断概率小于 $\alpha = 0.5$ 时的中断概率。这是因为中继用于译码消耗的功率随着 $\alpha$ 变大而增加,从而收集到的能量减少,导致中继节点R发送信号功率减小,目的节点D中断概率升高。

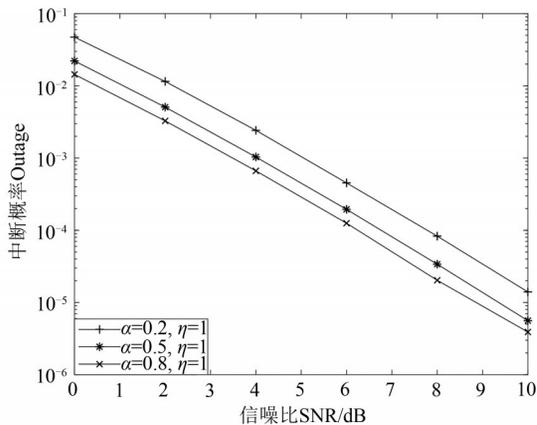


图4 不同 $\alpha$ 条件下基于SWIPT的Polar编码协作系统中断概率比较

Fig. 4 Comparison of outage probability of Polar coded cooperation based on SWIPT under different  $\alpha$  conditions

## 5.3 基于SWIPT的Polar编码协作系统BER性能

图5比较了系统功率分配因子 $\alpha = 0.5$ ,能量利用率 $\eta = 1$ , $d_{SD} = 2d_{RD} = 2$ ,目的节点D配置 $L = 2, 3, 4$ 根天线情况下基于SWIPT的Polar编码协作系统和传统非协作点对点系统的BER性能。图中可以看出,相比于非协作系统,本文所提出的系统在相同天线数情况下BER性能较优。例如天线数为4时,在SNR=5 dB时,非协作系统的误码率约为 $10^{-1}$ ,而本文所提系统的误码率约为 $10^{-3}$ 。这主要是由于D处采用了联合SC译码且S-D和R-D衰落信道相互独立,使得本文所提系统获得更高的分集增益。

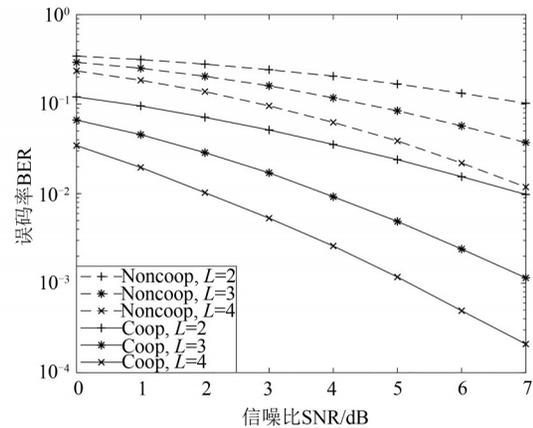


图5 不同天线数下基于SWIPT的Polar编码协作系统与非协作系统的误码率比较

Fig. 5 Comparison of the bit error rate between the Polar coded cooperation based on SWIPT technology and the Polar coded non-cooperation with different antenna numbers

## 5.4 不同码长、码率条件下基于SWIPT的Polar编码协作系统BER性能

图6比较了基于SWIPT的Polar编码协作系统在瑞利衰落信道条件下,信源节点不同码长、码率对BER影响。系统天线数为3,功率分配因子 $\alpha = 0.5$ , $d_{SD} = 2d_{RD} = 2$ 。从图中分析可知,在相同码率下,随着码长增加,BER性能也会提升。如当误码率在 $10^{-3}$ 时,码长为256比码长为128可获得0.8 dB左右的增益。这是由于随着码长增加,信道极化现象会愈发明显,故其译码性能也会提升。在相同码长情况下,码率越小,BER越小。当误码率在 $10^{-3}$ 时,码率为 $1/4$ 比码率为 $1/2$ 可获得2 dB左右的增益。这是因为码率越低,信息比特受到更好的保

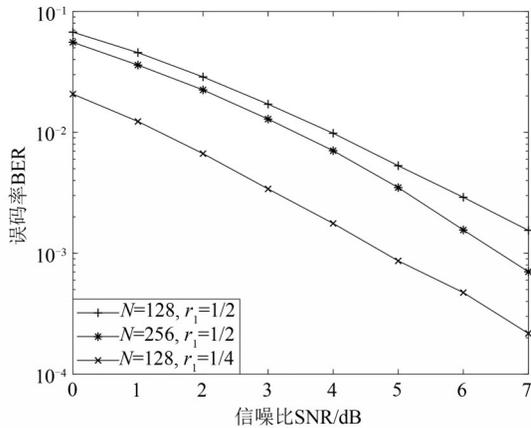


图 6 不同码长、码率下基于 SWIPT 的 Polar 编码协作系统的误码率比较

Fig. 6 BER Comparison of Polar coded cooperation based on SWIPT technology under different code length and code rate

护, 译码错误比特也会减少, 从而译码性能提升。

### 5.5 不同 $\eta$ 条件下基于 SWIPT 的 Polar 编码协作系统 BER 性能

研究基于 SWIPT 的 Polar 编码协作系统在瑞利衰落信道条件下能量利用率  $\eta$  对 BER 的影响, 其中系统天线数为 3, 功率分配因子  $\alpha = 0.5, d_{SD} = 2d_{RD} = 2$ 。从图 7 可以看出, 当  $\eta = 0.8$  时系统的 BER 最小; 当  $\eta = 0.5$  时, 由于中继节点 R 的能量利用率只有 50%, 其误码率性能较  $\eta = 0.8$  时差; 而当  $\eta = 0.2$  时, 即 R 只将 RF 信号收集能量的 20% 用于发送信息, 此时误码性能最差, 系统的 BER 最高。故 R 的信息译码能量利用率越高, 则本文所提系统 BER 性能越好。

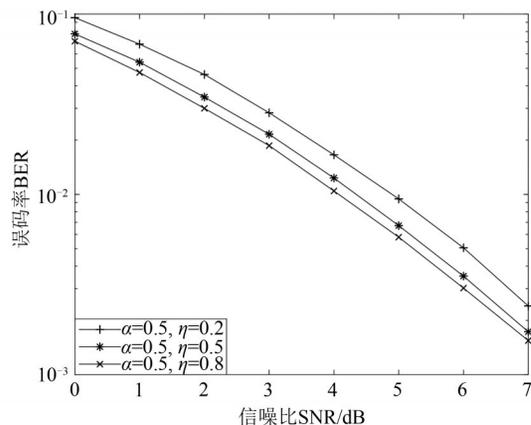


图 7 不同  $\eta$  条件下基于 SWIPT 的 Polar 编码协作系统的误码率比较

Fig. 7 BER Comparison of Polar coded cooperation based on SWIPT technology under different  $\eta$  conditions

### 5.6 基于 SWIPT 的 Polar 编码协作系统与基于 SWIPT 的随机 LDPC 编码协作系统的 BER 性能对比

图 8 对比了基于 SWIPT 的 Polar 编码协作系统与基于 SWIPT 的随机 LDPC 编码协作系统的 BER 性能, 其中用到的 Polar 码见表 1, LDPC 码见表 2。由于基于 SWIPT 的随机 LDPC 编码协作系统中继节点处只发送校验比特至目的节点 D, 为了使两系统 D 处接收相同比特数信息, 基于 SWIPT 的随机 LDPC 编码协作系统中继节点处码长采用 256 比特, 码率为 1/2。系统天线数为 3, 功率分配因子  $\alpha = 0.5$ , 能量利用率  $\eta = 1, d_{SD} = 2d_{RD} = 2$ 。从图 8 可以看出, 系统采用的 Polar 码性能优于迭代次数为 1 时的随机 LDPC 码, 在  $BER=10^{-2}$  时, Polar 编码协作系统相比随机 LDPC 编码协作系统有 0.5 dB 的增益。当迭代次数增大到 5, 基于 SWIPT 的随机 LDPC 编码协作系统 BER 性能则优于基于 SWIPT 的 Polar 编码协作系统, 因为 Polar 码的 SC 译码实际上相当于只迭代一次的译码算法。

表 2 随机 LDPC 编码协作系统各节点采用的 LDPC 码  
Tab. 2 Random LDPC code encoding LDPC code adopted by each node of the cooperative system

信源节点(S)	中继节点(R)
码率 $r_1 = 1/2$	码率 $r_2 = 1/2$
码长 $N_1 = 128$	码长 $N_2 = 256$
$d_v = 3, d_c = 6$	$\tilde{d}_v = 3, \tilde{d}_c = 6$

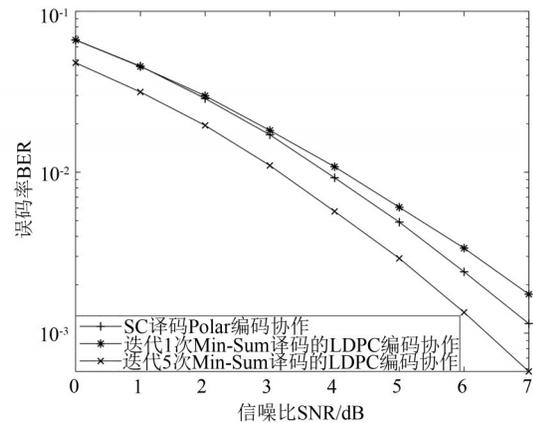


图 8 基于 SWIPT 的 Polar 编码协作系统与采用随机 LDPC 编码协作系统的 BER 比较

Fig. 8 BER comparison between the Polar coded cooperation based on SWIPT technology and the random LDPC coded cooperation

## 6 结论

本文研究了基于 SWIPT 的 Polar 编码协作系统, 中继节点 R 从信源节点 S 发出的 RF 信号中收集能量, 不需要外部供给, 故可以突破能量制约, 提升系统能量利用率和生存时间。基于 Plotkin 构造方法对 S 与 R 的 Polar 码进行了联合设计, 提高了 S 与 R 的编码效率。并提出了相应联合 SC 译码, 降低了译码复杂度。通过理论分析与仿真结果表明, 与非能量收集点对点系统相比, 本文所提系统中断概率大大降低。数值仿真表明, 当采用译码复杂度较低的 SC 译码时, 基于 SWIPT 的 Polar 码编码协作系统误码率性能优于采用迭代 1 次 Min-Sum 译码的随机 LDPC 码, 差于采用迭代 5 次 Min-Sum 译码的随机 LDPC 码。仿真结果也表明, R 处用于译码的功率越少、能量利用率越高, 则系统的性能越好。

### 参考文献

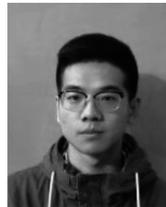
- [1] SENDONARIS A, ERKIP E, AAZHANG B. User cooperation diversity. Part I. System description [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2003, 51(11): 1927-1938.
- [2] SENDONARIS A, ERKIP E, AAZHANG B. User cooperation diversity. Part II. Implementation aspects and performance analysis [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2003, 51(11): 1939-1948.
- [3] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [4] BAO Xingkai. Wireless user cooperation strategies, coding schemes, and applications [D]. Lehigh University, 2009.
- [5] 代锁蕾, 韩昌彩. 结合 6-QAM 和双层 LDPC 码的编码调制研究 [J]. *信号处理*, 2021, 37(4): 507-517.  
DAI Suolei, HAN Changcai. Investigation on coded modulation combining 6-QAM and two-level LDPC codes [J]. *Journal of Signal Processing*, 2021, 37(4): 507-517. (in Chinese)
- [6] 张顺外. LDPC 编码协作系统性能与码的设计研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.  
ZHANG Shunwai. LDPC-coded cooperation: Performance studies and codes design [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [7] MOUALEU J M, HAMOUDA W, XU Hongjun, et al. Multi-relay turbo-coded cooperative diversity networks over nakagami- $m$  fading channels [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(9): 4458-4470.
- [8] ARIKAN E, TELATAR E. On the rate of channel polarization [C]//2009 IEEE International Symposium on Information Theory. Seoul, Korea (South). IEEE, 2009: 1493-1495.
- [9] ARIKAN E. Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2009, 55(7): 3051-3073.
- [10] JIN Ming, WANG Junming, ZHANG Yan, et al. The research and design of single relay coded cooperative system based on Polar codes [C]//2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). Yangzhou, China. IEEE, 2017: 254-258.
- [11] TAN Jiawei, LIU Wei, WANG Tian, et al. An adaptive collection scheme-based matrix completion for data gathering in energy-harvesting wireless sensor networks [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 6703-6723.
- [12] MAO Yuyi, YU Guanding, ZHONG Caijun. Energy consumption analysis of energy harvesting systems with power grid [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2013, 2(6): 611-614.
- [13] ZHANG Jiantao, ZHANG Xiaobo, SHU Chang, et al. Modeling and nonlinear analysis of stepped beam energy harvesting from galloping vibrations [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2020, 479: 115354.
- [14] VARSHNEY L R. Transporting information and energy simultaneously [C]//2008 IEEE International Symposium on Information Theory. Toronto, ON, Canada. IEEE, 2008: 1612-1616.
- [15] GUO Delin, TANG Lan, ZHANG Xinggan. Joint energy allocation and multiuser scheduling in SWIPT systems with energy harvesting [J]. *IET Communications*, 2020, 14(6): 956-966.
- [16] SETHU L P, JIBUKUMAR M G. SWIPT in multi-hop amplify-and-forward wireless sensor networks [J]. *International Journal of Electronics*, 2020, 107(4): 630-643.
- [17] ZHOU Xun, ZHANG Rui, HO C K. Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(11): 4754-4767.
- [18] LEE C, JANG G, CHO S. Energy-efficient adaptive directional queue-stable stochastic scheduling for SWIPT in NOMA [C]//2020 International Conference on Information

- Networking (ICOIN). Barcelona, Spain. IEEE, 2020: 76-79.
- [19] 杨晓霞. 基于 SWIPT 的大规模 MIMO 系统安全能效优化算法研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2020.
- YANG Xiaoxia. Research on secure energy efficiency optimization algorithm in massive MIMO system based on SWIPT [D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2020. (in Chinese)
- [20] NASIR A A, ZHOU Xiangyun, DURRANI S, et al. Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(7):3622-3636.
- [21] GUO Jing, ZHANG Shun, ZHAO Nan, et al. Performance of SWIPT for full-duplex relay system with co-channel interference[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(2): 2311-2315.
- [22] 张顺外, 仰枫帆, 宋荣方. 面向能量收集的编码协作系统性能与码的设计研究[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(12):2863-2868.
- ZHANG Shunwai, YANG Fengfan, SONG Rongfang.

Performance analysis and codes design of coded cooperation with energy harvesting[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(12): 2863-2868. (in Chinese)

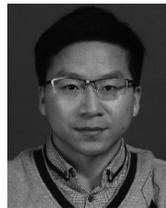
- [23] EJAZ S, YANG Fengfan, SOLIMAN T H M. Network Polar coded cooperation with joint SC decoding [J]. Electronics Letters, 2015, 51(9): 695-697.

#### 作者简介



夏子寒 男, 1997年生, 江苏徐州人。2018年于江苏师范大学获得学士学位, 现为南京邮电大学通信与信息工程学院硕士研究生, 主要研究方向为 Polar 码编码与绿色通信。

E-mail: XiaZiHanNatsu@163.com



张顺外(通信作者) 男, 1987年生, 江西九江人。南京邮电大学通信与信息工程学院副教授, 硕士生导师。主要研究方向为高效信道编码与协同通信。

E-mail: swzhang@njupt.edu.cn