

文章编号:1007-5321(2021)01-0014-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2020-043

基于 SWIPT 的半双工中继 QF 协作可达速率分析

张顺外, 石笑笑

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 南京 210003)

摘要:为解决中继节点能量受限的问题及提高系统能量效率以实现可靠绿色通信,提出了基于无线携能传输(SWIPT)技术的半双工中继量化转发(QF)协作系统.首先,建立基于 SWIPT 的半双工中继 QF 协作系统模型,信源节点和目的节点由电源供电,中继节点通过 SWIPT 技术同时实现信息传输和能量收集;其次,在功率分割协议下,推导出基于 SWIPT 的 QF 协作的可达速率表达式,证明可达速率是关于功率分割因子的凸函数,并求解出最优功率分割因子以优化可达速率;然后,针对慢衰落信道,进一步分析了基于 SWIPT 的 QF 协作的预期速率;最后,理论分析与仿真结果表明,基于 SWIPT 的 QF 协作的可达速率或预期速率均明显优于传统放大转发和译码转发协作,并且基于 SWIPT 的 QF 协作在中继节点没有外部供电的情形下,能达到与传统 QF 协作相近的性能.

关键词:无线携能传输技术;量化转发协作;功率分割协议;可达速率;预期速率

中图分类号:TN911.2

文献标志码:A

Achievable Rate of the SWIPT-Based Half-Duplex Relay QF Cooperative System

ZHANG Shun-wai, SHI Xiao-xiao

(College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Aiming to solve the problem of energy limitation of relay node and improve the energy efficiency of the system for achieving reliable green communication, the half-duplex relay quantize-and-forward (QF) cooperative system is studied based on simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT). Firstly, a SWIPT-based half-duplex relay QF cooperative system model is established. The source node and destination node are powered by external power. The relay node simultaneously implements information transmission and energy harvesting by SWIPT. Then, for the power-splitting protocol, the achievable rate expression of the SWIPT-based QF cooperation is derived. It is proved that the achievable rate is a convex function with respect to the power-splitting factor, and the optimal power-splitting factor is obtained to maximize achievable rate. Furthermore, for slow fading channels, the expected rate of SWIPT-based QF cooperation is further analyzed. Finally, the analysis and simulation shows that the achievable rate or expected rate of SWIPT-based QF cooperation is obviously superior to that of traditional amplify-and-forward and decode-and-forward cooperation, and SWIPT-based QF cooperation achieves similar performance to that of traditional QF cooperation in the absence of external power supply for the relay.

Key words: simultaneous wireless information and power transfer technology; quantize-and-forward coop-

收稿日期:2020-04-23

基金项目:国家自然科学基金项目(61501256);江苏省高等学校自然科学研究面上项目(20KJB510034);南京邮电大学国自基金孵化项目(NY219073)

作者简介:张顺外(1987—),男,副教授,硕士生导师,E-mail:swzhang@njupt.edu.cn.

eration; power-splitting protocol; achievable rate; expected rate

随着绿色通信技术的快速发展,能量收集(EH, energy harvesting)技术成为研究热点,与传统的能量收集技术不同,无线携能传输(SWIPT, simultaneous wireless information and power transfer)技术^[1]将射频(RF, radio frequency)信号作为能量源,经过转换装置转换为电能进行存储,供自身无供电的终端使用. SWIPT 技术能同时传输信息与能量,是一种延长无线通信系统生存时间的有效方法. Zhou 等^[2]提出了 2 种 SWIPT 协议,即功率分割(PS, power splitting)协议和时间切换(TS, time switching)协议. PS 协议是将接收的 RF 信号功率分成两部分,分别用于 EH 和信息译码. 在 TS 协议中, EH 设备在一段时间内从其接收的 RF 信号中获取能量,而在剩余时间内译码其接收的信息.

协作技术可追溯至 1979 年 Cover 等对中继信道的研究,常见协作方式包括:放大转发(AF, amplify-and-forward)方式^[3]、译码转发(DF, decode-and-forward)方式^[4]、编码协作方式^[5]等. 基于 SWIPT 的协作技术融合了 SWIPT 技术与协作技术,能实现可靠的绿色通信,引起了广泛关注. Hu 等^[6]研究了基于 SWIPT 的 AF 协作系统,提出了一种基于最小机会成本的中继选择算法以延长系统的生存时间,并证明了中断概率要求严格时所提方案的优越性. Zhang 等^[7]针对基于 SWIPT 的 AF 双向中继协作的能效优化问题展开研究,建立了基于统计的能量效率模型,通过非线性分式规划求解得出闭合解,并将其推广至多中继多用户场景. In 等^[8]研究了 PS 协议下基于 SWIPT 的 DF 协作系统,分析了可达速率—能量(R-E, rate-energy)区域,并提出了一种新的能量收集协议,即信息和能量信号多址广播协议,以改善可达 R-E 区域. Zou 等^[9]考虑一个基于 SWIPT 的 DF 单信源多中继协作系统,提出了最佳功率分配和中继选择算法,推导出了系统中断概率解析表达式,并分析了高信噪比(SNR, signal noise ratio)下系统的分集增益.

与 AF 或 DF 协作方式相比,量化转发(QF, quantize-and-forward)协作方式下中继节点将其接收的信号进行简单量化,然后将量化后的信号转发至目的节点. 量化后的信号无噪声积累,便于存储、处理和交换,复杂度较低,便于加密处理,更有利于信息的安全传输. Yao 等^[10]研究了 QF 协作在离散无

记忆加性高斯白噪声(AWGN, additive white Gaussian noise)半双工中继信道上的可达速率,并将其扩展至慢衰落信道上,证明了 QF 协作相比压缩转发协作更适合慢衰落信道. Yao 等^[11]研究了 QF 协作在慢衰落半双工信道上的中断概率和预期速率,并表明在信道状态信息(CSI, channel state information)仅在接收端可知情形下,从目的节点到中继节点的简单反馈可以进一步改善 QF 协作的性能. 目前暂未见基于 SWIPT 的 QF 协作的相关研究.

鉴于上述情形,提出了基于 SWIPT 的半双工中继 QF 协作系统,解决了中继节点能量受限的问题,实现了可靠的绿色通信,主要贡献概述如下:① 推导出了基于 SWIPT 的半双工中继 QF 协作的可达速率表达式;② 针对 AWGN 信道,求解出 PS 协议下最优功率分割因子以优化可达速率;③ 针对慢衰落信道,分析了基于 SWIPT 的半双工中继 QF 协作的预期速率,并进一步通过数值仿真验证了系统性能.

1 基于 SWIPT 的半双工中继 QF 协作系统描述

基于 SWIPT 的半双工中继 QF 协作系统模型如图 1 所示. 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. 假定信源节点 S 由电源供电,而中继节点 R 处无供电,需要从接收信号中收集能量,并将收集到的能量用于信息传输. 在协作方式下,中继节点先对其接收信号进行量化,再将量化后的信息经 R-D 信道发送至目的节点 D.

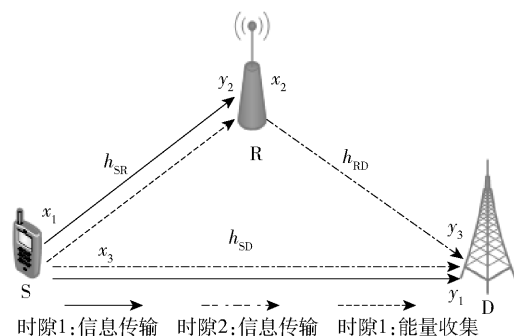


图 1 基于 SWIPT 的半双工中继 QF 协作系统模型

假定 S-R、S-D 和 R-D 信道的增益分别为 $|h_{SR}|^2$ 、 $|h_{SD}|^2$ 和 $|h_{RD}|^2$, T 为整个时间块的持续时间,将其分成 2 个时隙(子块),且 2 个时隙的持续时间相

等,均为 $T/2$. 信源节点 S 在整个时间块中发送信息,而中继节点 R 在第 1 时隙接收并在第 2 时隙发送. x_1 和 x_3 分别表示第 1 和第 2 时隙信源节点 S 发送的信号, x_2 表示第 2 时隙中继节点 R 发送的信号, y_1 和 y_3 分别表示第 1 和第 2 时隙目的节点 D 接收的信号, y_2 表示第 1 时隙中继节点 R 接收的信号.

1.1 中继节点能量收集

中继节点 R 接收到来自信源节点 S 的信号,在 PS 协议下,通过 SWIPT 技术得到的能量信号为

$$y_{EH} = \sqrt{P_1 \rho} h_{SR} x_1 + n_R \quad (1)$$

其中: ρ 为功率分割因子, P_1 为信源节点 S 第 1 时隙的发射功率, n_R 为服从均值为 0、方差为 δ_R^2 的复加性高斯白噪声.

故中继节点收集的能量为

$$E = \eta \rho P_1 |h_{SR}|^2 T/2 \quad (2)$$

其中: η 为能量转换效率, $0 < \eta < 1$.

进一步,可得出中继节点的发送功率为

$$P_R = \eta \rho P_1 |h_{SR}|^2 \quad (3)$$

1.2 接收端信息传输

在 QF 协作方式下,中继节点先对接收的信号进行量化,再将量化后的信号进行转发.

中继节点的接收信号表示为

$$y_2 = \sqrt{P_1(1-\rho)} h_{SR} x_1 + n_R \quad (4)$$

在第 1 时隙,目的节点的接收信号为

$$y_1 = \sqrt{P_1} h_{SD} x_1 + n_D \quad (5)$$

在第 2 时隙,目的节点的接收信号为

$$y_3 = \sqrt{P_R} h_{RD} x_2 + \sqrt{P_3} h_{SD} x_3 + n_D \quad (6)$$

中继节点量化后的信号为

$$\hat{y}_2 = y_2 + z_Q \quad (7)$$

其中: P_3 为信源节点第 2 时隙的发射功率,中继节点将第 1 时隙接收的信号 y_2 量化得到 \hat{y}_2 ,在第 2 时隙通过信号 x_2 发送其对应的量化索引^[11-12]; n_D 为服从均值为 0、方差为 δ_D^2 的复高斯白噪声; z_Q 为独立的高斯随机变量^[11],均值为 0,方差为 δ_Q^2 .

2 基于 SWIPT 的半双工中继 QF 协作可达速率分析

在分析 AWGN 半双工中继 QF 协作可达速率基础上,推导出基于 SWIPT 的 QF 协作在 AWGN 信道下最大可达速率表达式. 并进一步推广分析其在慢衰落信道下的预期速率.

2.1 AWGN 半双工中继 QF 协作

AWGN 半双工中继 QF 协作可达速率见定理 1.

定理 1 记 $C_1 = |h_{SD}|^2$, $C_2 = |h_{SR}|^2$, $C_3 = |h_{RD}|^2$,在 AWGN 信道下 C_1 、 C_2 、 C_3 为固定值,假定归一化 $\delta_R^2 = \delta_D^2 = 1$,则 AWGN 半双工中继 QF 协作的可达速率为

$$R < \max_{\delta_Q^2} \min \left\{ \frac{1}{4} \text{lb} \left(1 + C_1 P_1 + \frac{C_2 P_1}{1 + \delta_Q^2} \right) + \frac{1}{4} \text{lb} (1 + C_1 P_3), \right.$$

$$\left. \frac{1}{4} \text{lb} \left[1 + \frac{(1 + C_1 P_1) \delta_Q^2}{1 + \delta_Q^2} \right] + \frac{1}{4} \text{lb} (1 + C_1 P_3 + C_3 P_2) \right\} \quad (8)$$

其中 P_2 为中继节点的发送功率. 定理 1 的证明参见文献[11].

2.2 基于 SWIPT 的 AWGN 半双工中继 QF 协作

利用 SWIPT 技术,中继节点将收集的能量用于第 2 时隙的信息传输,此时式(8)中 $P_2 = P_R$,再结合式(4)~式(7),假定 $x_i \in X_i$ ($i = 1, 2, 3$)、 $y_i \in Y_i$ 、 $\hat{y}_2 \in \hat{Y}_2$,则相关的平均互信息如下^[10]:

$$I(X_1; Y_1, \hat{Y}_2) = I(X_1; Y_1, Y_2 + Z_Q) = \frac{1}{2} \text{lb} \left[1 + C_1 P_1 + \frac{C_2 P_1 (1 - \rho)}{1 + \delta_Q^2} \right] \quad (9)$$

$$I(X_3; Y_3 | X_2) = \frac{1}{2} \text{lb} (1 + C_1 P_3) \quad (10)$$

$$I(X_1; Y_1) = \frac{1}{2} \text{lb} (1 + C_1 P_1) \quad (11)$$

$$I(X_1; \hat{Y}_2) = I(X_1; Y_2 + Z_Q) = \frac{1}{2} \text{lb} \left[1 + \frac{C_2 P_1 (1 - \rho)}{1 + \delta_Q^2} \right] \quad (12)$$

$$I(Y_2; \hat{Y}_2) = \frac{1}{2} \text{lb} \left[1 + \frac{1 + C_2 P_1 (1 - \rho)}{\delta_Q^2} \right] \quad (13)$$

$$I(X_3, X_2; Y_3) = \frac{1}{2} \text{lb} (1 + C_1 P_3 + C_2 C_3 \eta \rho P_1) \quad (14)$$

由式(11)~式(13)可得:

$$I(X_1; Y_1) + I(X_1; \hat{Y}_2) - I(Y_2; \hat{Y}_2) = \frac{1}{2} \text{lb} \left[\frac{(1 + C_1 P_1) \delta_Q^2}{1 + \delta_Q^2} \right] \quad (15)$$

基于 SWIPT 的 AWGN 半双工中继 QF 协作的可达速率可进一步表示为

$$R < \max_{\delta_Q^2} \min \left\{ \frac{1}{2} I(X_1; Y_1, \hat{Y}_2) + \frac{1}{2} I(X_3; Y_3 | X_2), \right.$$

$$\frac{1}{2} [I(X_1; Y_1) + I(X_1; \hat{Y}_2) - I(Y_2; \hat{Y}_2)] + \frac{1}{2} I(X_2, X_3; Y_3) \Big\} = \max_{\delta_Q^2} \min \{I_1(\delta_Q^2), I_2(\delta_Q^2)\} \quad (16)$$

其中,

$$I_1(\delta_Q^2) = \frac{1}{4} \lg \left[1 + C_1 P_1 + \frac{C_2 P_1 (1 - \rho)}{1 + \delta_Q^2} \right] + \frac{1}{4} \lg(1 + C_1 P_3) \quad (17)$$

$$I_2(\delta_Q^2) = \frac{1}{4} \lg \left[\frac{(1 + C_1 P_1) \delta_Q^2}{1 + \delta_Q^2} \right] + \frac{1}{4} \lg(1 + C_1 P_3 + C_2 C_3 \eta \rho P_1) \quad (18)$$

由 $I_1(\delta_Q^2)$ 的表达式可知, $I_1(\delta_Q^2)$ 是关于 δ_Q^2 的单调减函数; 由 $I_2(\delta_Q^2)$ 的表达式可知, $I_2(\delta_Q^2)$ 是关于 δ_Q^2 的单调增函数, 则当且仅当 $I_1(\delta_Q^2) = I_2(\delta_Q^2)$ 时, QF 协作可得到最大理论可达速率 R_{QF} 的表达式.

令 $I_1(\delta_Q^2) = I_2(\delta_Q^2)$, 得到 δ_Q^2 的表达式为

$$\delta_Q^2 = \frac{1 + C_1 P_1 + C_2 P_1 (1 - \rho)}{(1 + C_1 P_1) \left(\frac{C_2 C_3 \eta \rho P_1}{1 + C_1 P_3} \right)} \quad (19)$$

得到 QF 协作的最大理论可达速率表达式为

$$R_{\text{QF}} = \frac{1}{4} \lg \left[1 + C_1 P_1 + \frac{C_2 P_1 (1 - \rho)}{1 + \frac{1 + C_1 P_1 + C_2 P_1 (1 - \rho)}{(1 + C_1 P_1) \left(\frac{C_2 C_3 \eta \rho P_1}{1 + C_1 P_3} \right)}} \right] + \frac{1}{4} \lg(1 + C_1 P_3) \quad (20)$$

2.3 功率分割因子优化

当信源节点发送功率 $P_1 = P_3$, 得到式(20)的简化式

$$R_{\text{QF}} = \frac{1}{4} \lg \left[1 + C_1 P_1 + \frac{C_2 P_1 (1 - \rho)}{1 + \frac{1 + C_1 P_1 + C_2 P_1 (1 - \rho)}{C_2 C_3 \eta \rho P_1}} \right] + \frac{1}{4} \lg(1 + C_1 P_3) \quad (21)$$

由式(21)可知, R_{QF} 是关于 ρ 的函数, 且只有部分分式与 ρ 有关, 为简化运算, 记作

$$Z(\rho) = 1 + C_1 P_1 + \frac{C_2 P_1 (1 - \rho)}{1 + \frac{1 + C_1 P_1 + C_2 P_1 (1 - \rho)}{C_2 C_3 \eta \rho P_1}} \quad (22)$$

因此, 可将系统的最大可达速率的求解问题表

述为

$$\max_{\rho} Z(\rho) = 1 + C_1 P_1 + \frac{C_2 P_1 (1 - \rho)}{1 + \frac{1 + C_1 P_1 + C_2 P_1 (1 - \rho)}{C_2 C_3 \eta \rho P_1}} \quad \text{s. t. } 0 < \rho < 1 \quad (23)$$

求 $Z(\rho)$ 关于 ρ 的一阶偏导可得:

$$\frac{\partial Z(\rho)}{\partial \rho} = \frac{-C_2 P_1}{1 + \frac{C_1 P_1 + C_2 P_1 (1 - \rho) + 1}{C_2 C_3 \eta \rho P_1}} + \frac{C_2 P_1 (1 - \rho) \left[\frac{1}{C_3 \eta \rho} + \frac{C_1 P_1 + C_2 P_1 (1 - \rho) + 1}{C_2 C_3 \eta \rho^2 P_1} \right]}{\left[1 + \frac{C_1 P_1 + C_2 P_1 (1 - \rho) + 1}{C_2 C_3 \eta \rho P_1} \right]^2} \quad (24)$$

令 $\frac{\partial Z(\rho)}{\partial \rho} = 0$, 解得:

$$\rho^* = \frac{C_1 P_1 - \sqrt{(C_1 P_1 + C_2 P_1 + 1)(C_1 P_1 + C_2 C_3 P_1 \eta + 1)} + C_2 P_1 + 1}{C_2 P_1 - C_2 C_3 P_1 \eta} \quad (25)$$

由式(24)可知: $Z(\rho)$ 在 $(0, \rho^*)$ 范围内, 是关于 ρ 的单调递增函数, 在 $[\rho^*, 1)$ 范围内是关于 ρ 的单调递减函数. 由此可得: 在 $(0, 1)$ 范围内有且仅有一个根 ρ^* 使得 $\frac{\partial Z(\rho)}{\partial \rho} = 0$, 因此 R_{QF} 是关于功率分割因子 ρ 的凸函数, 即在最优功率分割因子 ρ^* 处可得到可达速率 R_{QF} 的最大值.

2.4 基于 SWIPT 的慢衰落半双工中继信道的 QF 协作

对于慢衰落信道模型, 信道系数在单个时间块上保持不变, 而在块与块之间随机变化, 在这种情况下, 可达速率为随机变量. 在研究中继 QF 协作的性能时, 考虑系统预期速率.

为了方便起见, 记作 $\mathbf{C} = [C_1, C_2, C_3]$, QF 协作的可达速率 R_{QF} 通常表示为信道系数矢量的函数 $I_{\text{QF}}(\mathbf{C})$, 即 $I_{\text{QF}}(\mathbf{C}) = R_{\text{QF}}$, 其中 $I_{\text{QF}}(\mathbf{C})$ 为“瞬时可达速率”.

在整个传输过程中假定固定信息的传输速率为 r . 对于慢衰落信道, 在基于 SWIPT 的半双工中继 QF 协作中, 中断概率表示为

$$P_{\text{out}} = \Pr \{I_{\text{QF}}(\mathbf{C}) < r\} \quad (26)$$

根据上述中断概率的定义, 可以进一步定义预

期速率为

$$\bar{R} = r(1 - P_{\text{out}}) = r(1 - \Pr \{I_{\text{QF}}(\mathbf{C}) < r\}) \quad (27)$$

其中,

$$P_{\text{out}} = \Pr \left\{ (1 + C_1 P_1)^2 + \frac{C_2^2 C_3 P_1^2 \eta \rho (1 - \rho) (1 + C_1 P_3)}{1 + C_1 P_3 + C_2 P_1 (1 - \rho) + C_2 C_3 \eta \rho P_1} < 2^{4r} \right\} \quad (28)$$

3 仿真结果与分析

通过数值仿真分析基于 SWIPT 的半双工中继 QF 协作的可达速率和预期速率. 假设 AWGN 情形下, S-D、S-R 和 R-D 信道增益分别固定为 $C_1 = 0.3$ 、 $C_2 = 1$ 和 $C_3 = 1$. 信源节点在第 1 时隙和第 2 时隙的发送功率 $P_1 = P_3 = P$, 中继节点和目的节点的噪声功率归一化 $\delta_R^2 = \delta_D^2 = 1$, 则 S-D 信道的平均发送信噪比与发送功率相等, 即为 P .

3.1 不同协作方式下半双工中继可达速率的比较

研究基于 SWIPT 的半双工中继 QF 协作的可达速率, 并与传统的 QF、DF 和 AF 协作方式的可达速率进行比较, 结果如图 2 所示. 假定 QF 协作方式下, $\rho = 0.5$, $\eta = 0.9$. 传统协作方式中继节点由电源提供能量, 且功率 $P_2 = P$. 由图 2 可知, 在高信噪比下, 基于 SWIPT 的 QF 协作和传统 QF 协作的可达速率均比 DF 或 AF 协作更高. 这是因为 DF 或 AF 协作严格受到 S-R 信道限制, 对 S-R 信道可靠性依赖性更强, 而 QF 协作受 S-R 信道限制较小. 仿真结果同时表明: 基于 SWIPT 的 QF 协作的可达速率与传统 QF 协作的可达速率相近, 仅相差约 0.1 bit/s. 但由于基于 SWIPT 的 QF 协作中继节点无需外部电源提供能量, 因此能效更高, 更适用于能量受限的通信场景. 上述结论可推广至更一般的信道传播模型, 如经典的奥村传播模型等.

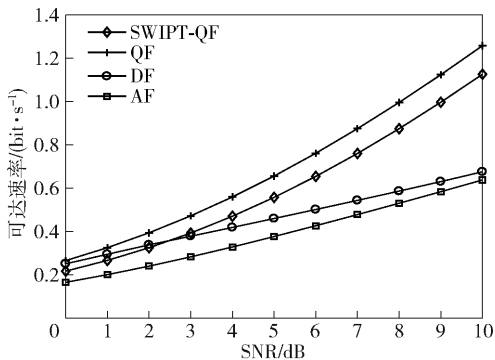


图2 不同协作方式下系统可达速率的比较

3.2 不同能量转换效率下基于 SWIPT 的半双工中继 QF 协作可达速率的比较

图 3 所示为不同能量转换效率下基于 SWIPT 的半双工中继 QF 协作的可达速率的对比. 假设功率分割因子 ρ 分别为 0.3、0.5 和 0.8, $P = 10$ W. 由图 3 可知, 当 ρ 固定时, 可达速率与能量转换效率 η 为正相关, 系统可达速率随着能量转换效率的增加而提升. 在 ρ 为 0.5 的情况下, $\eta = 0.3$ 时, 可达速率 $R_{\text{QF}} = 1.06$ bit/s, 而 $\eta = 0.8$ 时, 可达速率 $R_{\text{QF}} = 1.12$ bit/s, 性能提升约 5.7%, 这是因为能量转换效率越高, 中继节点可利用的能量越多, 中继节点的发送功率越高, 进而增大了系统的可达速率. 故提高系统实际的能量转换效率是改善系统可达速率的有效途径之一.

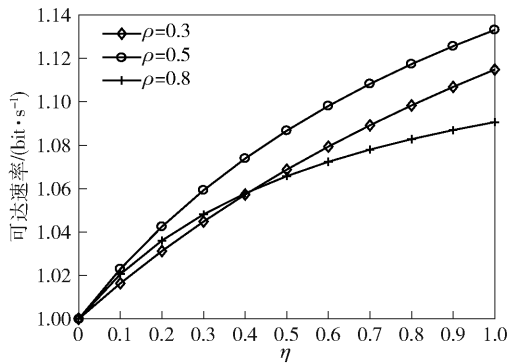


图3 不同能量转换效率下系统可达速率的比较

3.3 不同功率分割因子下基于 SWIPT 的半双工中继 QF 协作可达速率的比较

图 4 所示为不同功率分割因子下基于 SWIPT 的半双工中继 QF 协作的可达速率的对比. 假定信源节点发射功率分别为 6 W、10 W 和 15 W, $\eta = 0.9$. 由图 4 可知, 最优功率分割因子 ρ^* 即为仿真图中标“Δ”的位置. 如发射功率为 15 W 时, 得到最优功率分割因子 $\rho^* = 0.51$, 对应的可达速率最大约为

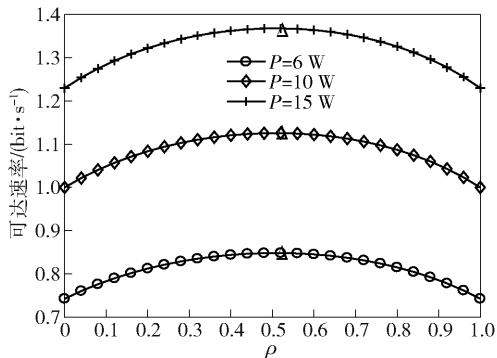


图4 不同功率分割因子下系统可达速率的比较

1.367 7 bit/s. 图 4 同时验证了, 在 $(0, \rho^*)$ 范围内, 可达速率随着功率分割因子的增加而单调增加; 在 $[\rho^*, 1)$ 范围内, 可达速率随着功率分割因子的增加而单调减小。

3.4 不同协作方式下半双工中继预期速率的比较

针对慢衰落信道, 信道系数在单个块上保持不变, 而在块与块之间随机变化, 研究了基于 SWIPT 的 QF 协作的预期速率, 并与传统的 QF、DF 和 AF 协作方式的预期速率比较. 假定 $\rho = 0.5, \eta = 0.9$, 固定信息传输速率 $r = 0.5$ bit/s. 由图 5 可知, 基于 SWIPT 的 QF 协作与传统 QF 协作的预期速率均优于 AF 或 DF 协作方式, 且前两者非常接近, 相差仅约 0.01 ~ 0.02 bit/s. 在高信噪比情况下, 基于 SWIPT 的 QF 协作和传统 QF 协作的预期速率近似一致, 但前者能效更高。

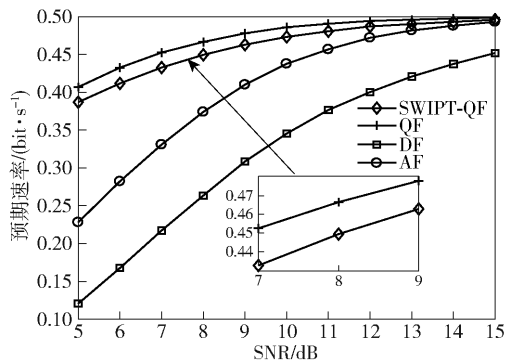


图 5 不同协作方式下系统预期速率的比较

4 结束语

提出了基于 SWIPT 的半双工中继 QF 协作系统模型. 在中继节点采用 PS 协议的情形下, 推导出基于 SWIPT 的 AWGN 半双工中继 QF 协作的可达速率表达式, 证明可达速率是关于功率分割因子的凸函数, 并求解出最优功率分割因子以优化可达速率. 然后, 进一步分析了基于 SWIPT 的慢衰落半双工中继 QF 协作的预期速率. 最后, 仿真结果表明, 基于 SWIPT 的 QF 协作的可达速率或预期速率均明显优于传统 AF 和 DF 协作, 并且基于 SWIPT 的 QF 协作在中继节点无电源供电的情形下, 能够达到与传统 QF 协作相近的性能, 且能效更高, 更适用于能量受限的通信场景。

参考文献:

[1] Abedi M, Masoumi H, Emadi M J. Power splitting-based

SWIPT systems with decoding cost [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(2): 432-435.

[2] 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): 4754-4761.

[3] Passerini F, Tonello A M. Analog full-duplex amplify-and-forward relay for power line communication networks [J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(4): 676-679.

[4] Jin Xianglan, Kim H N. A new switching superposition strategy in decode-forward relay system [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(8): 7826-7830.

[5] Zhang Shunwai, Yang Fengfan, Song Rongfang. Energy-harvesting-based RA-coded cooperative MIMO: codes design and performance analysis [J]. Digital Signal Processing, 2017, 60: 56-62.

[6] Hu Weiwen, Huang Wanjin, Li Chihpeng, et al. Lifetime maximization in AF cooperative networks with energy-harvesting relays [C] // IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). Cagliari: IEEE, 2017: 1-4.

[7] Zhang Chensi, Du Haoyu, Ge Jianhua. Energy-efficient power allocation in energy harvesting two-way AF relay systems [J]. IEEE Access, 2017, 5: 3640-3645.

[8] In C, Kim H M, Choi W. Achievable rate-energy region in two-way decode and forward energy harvesting relay systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(6): 3923-3935.

[9] Zou Yulong, Zhu Jia, Jiang Xiao. Joint power splitting and relay selection in energy-harvesting communications for IoT networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 7(1): 584-597.

[10] Yao S, Skoglund M, Kim T T, et al. Half-duplex relaying based on quantize-and-forward [C] // IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings. St. Petersburg: IEEE, 2011: 2447-2451.

[11] Yao S, Kim T T, Skoglund M, et al. Half-duplex relaying over slow fading channels based on quantize-and-forward [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2013, 59(2): 860-872.

[12] Lei Ming, Soleymani M R. Performance of the generalised quantise-and-forward scheme over the multiple-access relay channel [J]. IET Communications, 2014, 8(18): 3298-3307.