

DOI: 10.7652/xjtuxb201904009

无线能量传输中继选择与发送功率分配方案

刘彤, 廖学文, 高贞贞

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了最大化无线能量传输全双工多中继系统的传输速率,提出一种利用中继采集能量并进行中继选择和发送功率分配方案。首先在最好最差信道和最大调和平均值中继选择基础上,考虑中继自干扰信道能量采集,引入中继节点不同功率约束,提出基于节点功率的最好最差信道中继选择和最大调和平均值中继选择方案;然后联合源节点两阶段发送功率分配进行优化求解,给出优化问题解耦后的两步次优解方案,求解出功率分配参数的理论次优值;最后推导得出所提最优中继选择方法的中断概率。仿真结果表明,所提出的中继选择方案比随机选择中继的容量性能在系统中中继数为 5 时提高了 30% 以上;与中继选择等功率分配方案相比,所提分配方案的系统容量提升了 10% 以上,中断概率在发送信噪比为 15 dB 时下降了 16%。

关键词: 中继选择;全双工;能量传输;功率分配;中断概率

中图分类号: TN925 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)04-0058-07

A Scheme of Relay Selection and Transmission Power Allocation for Wireless Energy Transfer

LIU Tong, LIAO Xuewen, GAO Zhenzhen

(School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A scheme of relay selection and transmission power allocation with energy harvesting relay is proposed to maximize the transmission rate in the wireless-powered full-duplex (FD) multi-relay system. Bases on the best worse channel and best harmonic mean selection, the best worse channel selection and the best harmonic mean selection with nodes power algorithms is proposed by considering the relay self-interference channel and different power constraints. Then a capacity optimization problem is constructed by jointly considering relay selection and power allocation, and is decoupled into two-step sub-optimal problems to obtain the solution of power allocation parameters. Finally, the outage probability of the optimal relay selection method is derived. Numerical results show that the proposed scheme improves the capacity performance of the system by more than 30% compared with the random selection scheme when the system has 5 relays. A comparison with the equal power allocation scheme shows that the proposed scheme improves the capacity performance by 10% and the outage probability decreases by 16% when the signal to noise ratio is 15 dB.

Keywords: relay selection; full-duplex; energy transfer; power allocation; outage probability

以射频(RF)能量作为能量来源的无线能量传输(WET)技术具有部署方便和绿色无污染等优点,

被广泛用于有持续用电需求且节点更换电池不方便的通信网络^[1-4]。传统的协作中继网络的网络性能会受中继节点固定电源限制,因此,将 WET 与中继增强型技术中继选择结合进行研究,可以进一步提高协作通信系统的网络性能和频谱效率。

目前,针对能量传输中继选择系统的研究主要集中在分析单中继选择策略^[5-8]和多中继选择性能^[9-10],但系统模型多为中继节点工作在半双工模式,对于全双工能量受限的中继节点研究较少。在传统的全双工中继系统中,中继在接收信号时,会收到来自自身发送信号的干扰,所以克服自干扰是全双工中继技术的主要研究难点^[11]。在引入 WET 的全双工中继选择模型中,现有的能量采集方案主要有基于时间转换接收机^[12]和功率分割接收机^[13-14],但这些方案为了克服全双工中继的自干扰影响,需要额外的能量消耗进行干扰消除。

针对自干扰信号的影响,文献^[15]首先提出从能量采集的观点出发,将全双工中继节点的自干扰信号能量采集利用,提供节点工作消耗。在此方案的基础上,目前主要研究了三节点模型译码转发中继系统的中断概率,以及系统的吞吐量和能量效率^[16-17]。以上方案均是针对单中继系统,并未对多中继系统及中继选择模型进行探讨,也没有对源节点不同阶段的发送功率进行优化分配。

因此,为了最大化无线能量传输全双工多中继系统的传输速率,本文主要研究在多中继系统中,假设中继的自干扰在信号检测处理过程中理想消除,只考虑通过全双工中继的自干扰链路,对中继发送信号进行能量采集,为中继节点供能。以最大化系统容量为目标选择出最优中继,提出两种次优的启发式中继选择算法,并对第 1 阶段和第 2 阶段的发送功率进行分配。同时,推导得出系统的中断概率表达式。仿真结果表明,提出的基于能量传输全双工中继选择和发送功率分配方案有效提升了系统的平均容量以及中断性能。

1 系统模型

考虑图 1 所示的两跳中继系统模型,包括 N 个中继节点 R_i ,其中 $i=1,2,\dots,N$,具有能量采集功能。源节点和目的节点的直连链路由于传播路径过长或是有障碍影响不存在。源节点 S 和目的节点 D 都配有一根天线,有专用电池为其供电, N 个中继节点均配有 2 根天线,一根用来接收信息,另一根用来发送信息。传输过程分为 2 个阶段,第 1 阶段

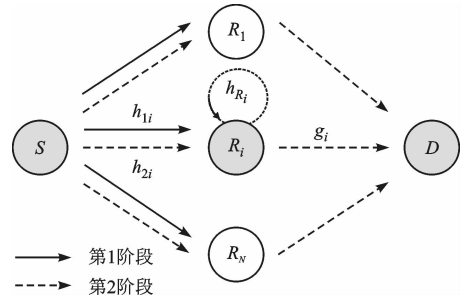


图 1 两跳中继系统模型

中源节点到中继节点 R_i 的信道增益为 h_{1i} ,第 2 阶段中源节点到中继节点 R_i 、中继节点 R_i 到目的节点和中继节点 R_i 的收发链路信道的信道增益分别为 h_{2i} 、 g_i 和 h_{Ri} 。中继节点在整个传输过程中的一半时间工作在半双工模式,另一半时间工作在全双工模式,可以在接收信号的同时发送信号,本文假设中继在接收能量信号的同时发送信息信号^[15]。

两跳中继系统的传输过程如图 2 所示,在一个传输时隙 T 内,包括 2 个阶段:第 1 阶段由源节点向中继节点 R_i 发送信息信号,中继节点 R_i 接收信息并存储起来,占用时间为 $T/2$;第 2 阶段中继节点 R_i 工作在全双工模式,源节点向中继节点发送能量信号,同时中继节点向目的节点放大转发信息,此时,中继节点 R_i 通过自身收发链路信道将干扰信号能量采集,为下一阶段供能,占用时间为 $T/2$ 。由于第 1 阶段中继节点并没有采集能量,此时中继仅用于接收和存储信息,与发送功率相比耗能所占比例较少,由节点初始存储能量提供,因此在后续性能分析中,忽略此部分能耗。假设在第 2 阶段中继节点 R_i 的能量消耗全部来自于采集的能量,采集能量包括源节点发送的能量和通过自干扰链路采集到自身发送信号的能量,其中信道增益 h_{1i} 、 h_{2i} 、 g_i 和 h_{Ri} 都服从均值为 0、方差分别为 σ_{SR1}^2 、 σ_{SR2}^2 、 σ_{RD}^2 和 σ_{RR}^2 的复高斯分布。

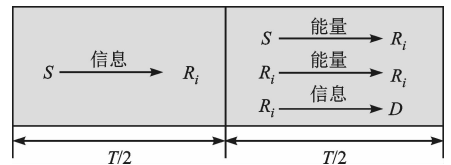


图 2 两跳中继系统的传输过程

源节点 S 在第 1 阶段以功率 P_{S1} 发送信息信号 x_1 ,此时中继 R_i 接收到的信号为

$$y_{R_{i,1}} = \sqrt{P_{S1}} h_{1i} x_1 + n_R \quad (1)$$

式中: n_R 为中继节点接收噪声,是均值为 0 的高斯白噪声,噪声功率为 σ_R^2 ,假设所有中继节点噪声功

率相同。

接着,源节点 S 在第 2 阶段以功率 P_{S_2} 发送能量信号 x_2 ,满足条件 $E\{|x_2|^2\}=1$,此时中继 R_i 工作在全双工模式, R_i 的能量采集电路不仅采集到源节点发送的能量,也通过自干扰链路采集到自身发送信号的能量,其接收到的信号为

$$y_{R_{i,2}} = \sqrt{P_{S_2}} h_{2i} x_2 + \beta_i h_{R_i} y_{R_{i,1}} + n_R \quad (2)$$

式中: β_i 为中继的放大转发系数,表示为

$$\beta_i = \frac{\sqrt{P_{R_i}}}{\sqrt{P_{S_1} \|h_{1i}\|^2 + \sigma_R^2}} \quad (3)$$

式中: P_{R_i} 为中继节点 R_i 的转发功率。同时,中继节点 R_i 向目的节点 D 放大转发第 1 阶段信息,目的节点 D 的接收信号为

$$y_{D,i} = \beta_i g_i y_{R_{i,1}} + n_D = \beta_i g_i \sqrt{P_{S_1}} h_{1i} x_1 + \beta_i g_i n_R + n_D \quad (4)$$

其中 n_D 为目的节点接收噪声,为 0 均值高斯白噪声,噪声功率为 σ_D^2 。目的节点 D 的信噪比公式为

$$\gamma_{D,i} = \frac{\beta_i^2 P_{S_1} \|h_{1i}\|^2 \|g_i\|^2}{\beta_i^2 \|g_i\|^2 \sigma_R^2 + \sigma_D^2} \quad (5)$$

在整个传输时隙 T 内,中继节点 R_i 只在第 2 阶段传输时间 $T/2$ 采集能量,可以得到其采集的总能量瞬时值为

$$E_{R_i} = \frac{T}{2} \eta (P_{S_2} \|h_{2i}\|^2 + P_{R_i} \|h_{R_i}\|^2 + \sigma_R^2) \quad (6)$$

式中: η 为能量转换效率,且 $0 < \eta < 1$ 。

2 中继选择

2.1 中继选择方案

由于多中继系统中每一个中继的前后向信道条件有好有坏,可根据一定的准则选择一个性能最优的中继进行工作。本文采用一种以最大化目的节点 D 的系统容量 C_i 为目标的中继选择方案。由于系统中中继节点具有能量采集功能,对于每一个中继节点来说,发送功率 P_{R_i} 不能大于其采集的总能量 E_{R_i} 。考虑中继发送功率的约束条件,列出如下优化问题

$$\left. \begin{aligned} \max_i \quad & C_i = \frac{1}{2} \ln(1 + \gamma_{D,i}) \\ \text{s. t.} \quad & 0 \leq P_{R_i} \frac{T}{2} \leq E_{R_i} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由于目的节点 D 的系统容量 C_i 随着接收信噪比 $\gamma_{D,i}$ 的增大而增大,可以将优化问题(7)的目标函数转化为最大化目的节点 D 接收信噪比 $\gamma_{D,i}$ 。对于优化问题中的功率约束条件来说,系统中中继节点

R_i 采集的所有能量 E_{R_i} 全部用于中继放大转发,即中继 R_i 转发功率 P_{R_i} 满足 $P_{R_i} T/2 = E_{R_i}$,因此可以进一步简化目的节点 D 的接收信噪比 $\gamma_{D,i}$ 。令 $W_i = P_{S_1} \|h_{1i}\|^2 + \sigma_R^2$, $V_i = P_{S_2} \|h_{2i}\|^2 + \sigma_R^2$,得到

$$\gamma_{D,i} = \frac{\eta P_{S_1} \|h_{1i}\|^2 \|g_i\|^2 V_i}{\eta \sigma_R^2 \|g_i\|^2 V_i + \sigma_D^2 W_i (1 - \eta \|h_{R_i}\|^2)} \quad (8)$$

基于以上分析,本文选择使目的节点 D 信噪比 $\gamma_{D,i}$ 为最大值的中继进行工作,即

$$i^* = \arg \max \gamma_{D,i} \quad (9)$$

除了上述满足中继发送功率约束条件,最大化目的节点 D 接收信噪比 $\gamma_{D,i}$ 的最优中继选择方案之外,为了进一步简化运算,本文提出 2 种次优的启发式中继选择算法,分别如下。

(1) 基于节点功率的最好最差信道选择。对于两跳中继协作网络,假设每个中继都知道自身的前后向信道信息,最好最差信道选择就是选择中继节点最差信道,即 $\min(|h_{1i}|, |g_i|)$ 的最好值。在传统方案中,源节点和中继节点的发送功率为固定值,本文模型中各个中继 R_i 的发送功率 P_{R_i} 均不相同,因此,在传统的中继最好最差信道选择中,加入源节点 S 和不同中继 R_i 的相应功率约束,提出基于节点功率的最好最差信道选择方案

$$i^* = \arg \max \min(P_{S_1} \|h_{1i}\|^2, P_{R_i} \|g_i\|^2) \quad (10)$$

(2) 基于节点功率的最大调和平均值选择。文献[18]中提出了基于最大调和平均值的中继选择方案,中继选择函数为中继前后向信道幅度值的调和平均数,即 $(\|h_{1i}\|^{-2} + \|g_i\|^{-2})^{-1}$,选择调和平均值最大的中继来参与协作。不同于传统选择方案中节点发送功率为固定值,本文考虑源节点 S 和中继节点相应的不同发送功率,提出基于节点功率的最大调和平均值选择方案

$$i^* = \arg \max \left(\frac{1}{P_{S_1} \|h_{1i}\|^2} + \frac{1}{P_{R_i} \|g_i\|^2} \right)^{-1} \quad (11)$$

2.2 发送功率分配

在上面所提的中继选择方案系统性能分析中,均假设传输过程第 1 阶段发送功率 P_{S_1} 和第 2 阶段发送功率 P_{S_2} 相等,即 $P_{S_1} = P_{S_2}$ 。由式(8)可以看出, $\gamma_{D,i}$ 随着 P_{S_1} 和 P_{S_2} 的增大而增大,然而在总功率一定的条件下, P_{S_1} 增大, P_{S_2} 会相应减小。由于 $\gamma_{D,i}$ 同时受 P_{S_1} 和 P_{S_2} 的影响,所以需要同时对 P_{S_1} 和 P_{S_2} 进行功率分配来获得最大的信噪比 $\gamma_{D,i}$ 。令 $P_{S_1} = \tau P$, $P_{S_2} = (1 - \tau)P$,其中分配参数 τ 满足 $0 \leq \tau \leq 1$, P 为总功率约束。根据功率分配条件,以最大化目的

节点信噪比 $\gamma_{D,i}$ 为优化目标,建立以下优化问题

$$\begin{aligned} \max_{\tau, i} \quad & \gamma_{D,i} = \frac{P_{S_1} \|h_{1i}\|^2 P_{R_i} \|g_i\|^2}{\sigma_R^2 P_{R_i} \|g_i\|^2 + \sigma_D^2 P_{S_1} \|h_{1i}\|^2 + \sigma_R^2 \sigma_D^2} \\ \text{s. t.} \quad & 0 \leq \tau \leq 1; P_{S_1} = \tau P; P_{S_2} = (1 - \tau) P \end{aligned} \quad (12)$$

为了求解优化问题(12),对运算进一步简化,假设中继节点 R_i 采集到的信号功率远大于节点 R_i 噪声功率,即 $P_{S_2} \|h_{2i}\|^2 + P_{R_i} \|h_{R_i}\|^2 \gg \sigma_R^2$,得到新的中继节点 R_i 的发送功率 P_{R_i} 表达式, $P_{R_i} = \eta P_{S_2} \|h_{2i}\|^2 / (1 - \eta \|h_{R_i}\|^2)$ 。令 $\gamma_1 = P \|h_{1i}\|^2$ 、 $\gamma_2 = P \|h_{2i}\|^2$ 、 $A = \eta \|g_i\|^2$ 、 $B = 1 - \eta \|h_{R_i}\|^2$ 、 $\sigma_D^2 = \sigma_R^2 = N_0$ 。源节点 S 的发送功率 P_{S_1} 、 P_{S_2} 关于分配参数 τ 的优化问题表示如下

$$\begin{aligned} \max_{\tau, i} \quad & \gamma_{D,i} = \gamma_1 \gamma_2 A \left[\frac{N_0 \gamma_1 B}{1 - \tau} + \frac{N_0 \gamma_2 A}{\tau} + \frac{N_0^2 B}{\tau(1 - \tau)} \right] \\ \text{s. t.} \quad & 0 \leq \tau \leq 1 \end{aligned} \quad (13)$$

对于优化问题(13)中的优化变量 τ 和 i ,由于2个变量相互关联,理论求解的过程中,无法对2个变量同时进行求解,为了使此问题可解,可采用分步求解的方法,先以一个确定的 τ 值,得出使目标函数 $\gamma_{D,i}$ 最大的最优 i 值,在确定出最优 i 值后,进一步求解得到 τ 的可行次优解,再用此次优解进行中继选择,反复迭代,最终得到优化问题的解。可以看出,目标函数目的节点信噪比 $\gamma_{D,i}$ 的分子 $\gamma_1 \gamma_2 A$ 与分配参数 τ 不相关,因此在优化问题求解过程中,只考虑信噪比 $\gamma_{D,i}$ 中的分母项。可以用 y 来表示目标函数

$\gamma_{D,i}$ 的分母项,即 $y = \frac{N_0 \gamma_1 B}{1 - \tau} + \frac{N_0 \gamma_2 A}{\tau} + \frac{N_0^2 B}{\tau(1 - \tau)}$ 。

要使目标函数信噪比 $\gamma_{D,i}$ 值最大,则信噪比 $\gamma_{D,i}$ 是关于分配参数 τ 的凹(或拟凹)函数,即 y 取最小值。 y 取最小值的条件为 $y > 0$,且 y 为关于分配参数 τ 的凸(或拟凸)函数。显然 $y > 0$,通过求 y 的二阶导,可以证明在 $0 \leq \tau \leq 1$ 时,满足 $\frac{\partial^2 y}{\partial \tau^2} > 0$ 。因此, y 在

$0 \leq \tau \leq 1$ 上有最小值。令 y 的一阶导为0,即

$$\frac{\partial y}{\partial \tau} = \frac{N_0 \gamma_1 B}{(1 - \tau)^2} - \frac{N_0 \gamma_2 A}{\tau^2} + \frac{N_0^2 B(2\tau - 1)}{\tau^2(1 - \tau)^2} = 0 \quad (14)$$

通过计算可以得到 y 取最小值时的分配参数 τ 的值,即

$$\tau^* = \frac{\sqrt{(A B \gamma_2 + B^2)(1 + \gamma_1)} - \gamma_2 A - N_0 B}{\gamma_1 B - \gamma_2 A} \quad (15)$$

当功率分配参数 $\tau = \tau^*$ 时,信噪比 $\gamma_{D,i}$ 取最大

值。关于第1阶段和第2阶段源节点 S 发送功率 P_{S_1} 、 P_{S_2} 的分配参数 τ 的优化问题得以求解。

3 中断概率分析

本文所采用的最大化目的节点信噪比 $\gamma_{D,i}$ 的最优中继选择方案中,目的节点信噪比 $\gamma_{D,i}$ 小于阈值 γ_{th} 时发生中断,其中 $\gamma_{th} = 2^{2R_t} - 1$, R_t 为容量阈值。最优中继选择策略的中断概率表达式为

$$P_{out}(\gamma_{th}) = \Pr(\gamma_{D,i}^* < \gamma_{th}) \quad (16)$$

由于本文考虑的所有信道相互独立且服从指数分布,其概率密度函数和分布函数分别为

$$\left. \begin{aligned} f(x) &= \lambda_{AB} \exp(-\lambda_{AB} x) \\ F(x) &= 1 - \exp(-\lambda_{AB} x) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中: $\lambda_{AB} \triangleq 1/\sigma_{AB}^2$ 。因此,式(16)可以表示为

$$P_{out}(\gamma_{th}) = (F_{\gamma_{D,i}}(\gamma_{th}))^N \quad (18)$$

式中: $F_{\gamma_{D,i}}(\cdot)$ 表示随机变量 $\gamma_{D,i}$ 的累积分布函数。

令 $P_{S_1} = P_{S_2} = P$, $\|h_{1i}\|^2 = \|h_{2i}\|^2$, $\gamma = \frac{P}{N_0}$, $X = \|h_{1i}\|^2 = \|h_{2i}\|^2$, $Y = \|g_i\|^2$, $Z = \|h_{LRi}\|^2$,可以得到每个中继 R_i 的信噪比 $\gamma_{D,i}$ 的累积分布函数

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{D,i}}(\gamma_{th}) &= \Pr(\gamma_{D,i} < \gamma_{th}) = \\ &= \Pr\left(Y < \frac{\gamma_{th}(1 + \gamma X)(1 - \eta Z)}{\eta \gamma^2 X^2 - \eta \gamma \gamma_{th} X}\right) \end{aligned} \quad (19)$$

由于 $X > \gamma_{th}/\gamma$ 和 $X < \gamma_{th}/\gamma$ 时 $F_{\gamma_{D,i}}(\cdot)$ 有不同的取值,因此对式(19)进行分段积分,得到

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{D,i}}(\gamma_{th}) &= \Pr\left(Y < \frac{\gamma_{th}(1 + \gamma X)(1 - \eta Z)}{\eta \gamma^2 X^2 + \eta \gamma \gamma_{th} X}\right) = \\ &= \int_0^{\frac{\gamma_{th}}{\gamma}} \Pr\left(Y > \frac{\gamma_{th}(1 + \gamma X)(1 - \eta Z)}{\eta \gamma^2 X^2 + \eta \gamma \gamma_{th} X}\right) f_X(x) dx + \\ &= \int_{\frac{\gamma_{th}}{\gamma}}^{\infty} \Pr\left(Y < \frac{\gamma_{th}(1 + \gamma X)(1 - \eta Z)}{\eta \gamma^2 X^2 + \eta \gamma \gamma_{th} X}\right) f_X(x) dx = \\ &= 1 - \lambda_{SR} \int_{\frac{\gamma_{th}}{\gamma}}^{\infty} \exp\left(-\lambda_{SR} x - \frac{\lambda_{RD} \gamma_{th}(1 + \gamma X)(1 - \eta Z)}{\eta \gamma^2 X^2 + \eta \gamma \gamma_{th} X}\right) dx \end{aligned} \quad (20)$$

在接收高信噪比时,可以进一步对式(20)进行化简,得到

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{D,i}}(\gamma_{th}) &\approx 1 - \lambda_{SR} \cdot \\ &\cdot \int_{\frac{\gamma_{th}}{\gamma}}^{\infty} \exp\left(-\lambda_{SR} x - \frac{\lambda_{RD} \gamma_{th}(1 - \eta Z)}{\eta \gamma X + \eta \gamma_{th}}\right) dx \end{aligned} \quad (21)$$

令 $w = \eta \gamma X + \eta \gamma_{th}$, 式(21)可以重写为式(22),其中 $K_1(\cdot)$ 为第二类一阶修正贝塞尔函数^[19]。

$$F_{\gamma_{D,i}}(\gamma_{th}) \approx 1 - \lambda_{SR} \exp\left(-\frac{\lambda_{SR} \gamma_{th}}{\gamma}\right) \cdot$$

$$\int_0^{\infty} \sqrt{\frac{4 \gamma_{th}(1 - \eta Z) \lambda_{SR} \lambda_{RD}}{\eta \gamma}} dz \cdot$$

$$\int_0^{\infty} K_1 \left(\sqrt{\frac{4\gamma_{th}(1-\tau\gamma)\lambda_{SR}\lambda_{RD}}{\eta\gamma}} \right) \exp(-\lambda_R z) dz \quad (22)$$

综上,获得了在两阶段发送功率相等时,单个中继 R_i 的信噪比 $\gamma_{D,i}$ 累积分布函数表达式,将式(22)代入式(18)中,最终得到以最大化目的节点信噪比 $\gamma_{D,i}$ 为目标的最优中继选择方案的中断概率表达式。

当两阶段发送功率不相等,即 $P_{S_1} = \tau P$ 、 $P_{S_2} = (1-\tau)P$ 时,中断概率推导过程与发送功率相等时相似,可以得到此时每个中继 R_i 的信噪比 $\gamma_{D,i}$ 的累积分布函数为

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{D,i}}(\gamma_{th}) = & \Pr \left(Y < \frac{\gamma_{th}(1+\tau\gamma X)(1-\eta Z)}{(1-\tau)\tau\eta\gamma^2 X^2 + (1-\tau)\eta\gamma\gamma_{th} X} \right) = \\ & 1 - \lambda_{SR} \int_{\gamma_{th}}^{\infty} \exp(-\lambda_{SR} x) dx + \\ & \lambda_{SR} \int_{\gamma_{th}}^{\infty} \exp \left(-\frac{\lambda_{RD}\gamma_{th}(1+\tau\gamma X)(1-\eta Z)}{(1-\tau)\tau\eta\gamma^2 X^2 + (1-\tau)\eta\gamma\gamma_{th} X} \right) dx \end{aligned} \quad (23)$$

将式(23)代入式(18)中,得到发送功率不相等时系统的中断概率表达式。

4 仿真结果与分析

本节主要给出了上述中继选择和功率分配方案的性能分析,以及系统中断概率的理论值和仿真值结果。不做特殊说明的情况下,本文的仿真参数设置如下:系统中继节点个数 $N=6$,源节点发送信噪比为 $0 \sim 30$ dB,噪声功率 $\sigma_D^2 = \sigma_R^2 = N_0 = 1$,各信道方差分别为 $\sigma_{SR1}^2 = \sigma_{SR2}^2 = 1$ 和 $\sigma_{RD}^2 = 1$ 。

图3为系统中继节点 R_i 的自身收发链路信道 h_{R_i} 的信道方差 σ_{RR}^2 对系统平均容量的影响。源节点 S 发送信噪比固定为 30 dB。从图3可以看出:信道方差 σ_{RR}^2 值越接近 1 ,系统的平均容量性能越好,表明自干扰链路方差越大,越有利于中继节点通过 h_{R_i} 采集能量;当信道方差 σ_{RR}^2 在 $0.2 \sim 0.8$ 之间变动时,

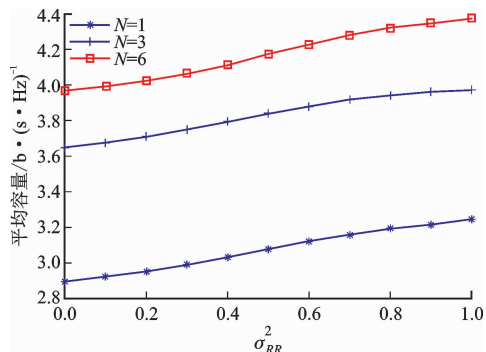


图3 h_{R_i} 的信道方差 σ_{RR}^2 对系统平均容量的影响

图中曲线斜率较大, σ_{RR}^2 的变化对平均容量性能影响更大。另外,随着系统中继个数的增多,经过中继选择方案,系统的平均容量性能有显著提升。

考虑系统中继节点 R_i 的自身收发链路信道 h_{R_i} 的信道方差分别为 $\sigma_{RR}^2 = 0.6$ 和 $\sigma_{RR}^2 = 0.1$ 时,两阶段源节点 S 发送功率无优化分配的系统容量,并仿真了联合发送功率分配参数 τ 与中继选择遍历得出最优的系统平均容量,结果如图4所示。由图4可见,当 h_{R_i} 的信道方差为 $\sigma_{RR}^2 = 0.6$ 时,系统平均容量性能优于 $\sigma_{RR}^2 = 0.1$ 的情况,分配参数与中继选择联合优化后的系统平均容量性能相比于等功率分配能提升 10% 以上。此外,本文推导得出的分配参数 τ 的可行次优解,与中继选择反复迭代,在 $\sigma_{RR}^2 = 0.1$ 时,此次优解得到的平均容量和联合分配参数与中继选择仿真遍历最优值基本一致;在 $\sigma_{RR}^2 = 0.6$ 时,次优解与仿真遍历最优值相比,存在少量性能损失,但此时平均容量性能仍好于无功率分配时的情形,说明推导的可行次优解在 h_{R_i} 的信道方差较小时,与联合遍历最优值一致性较高。

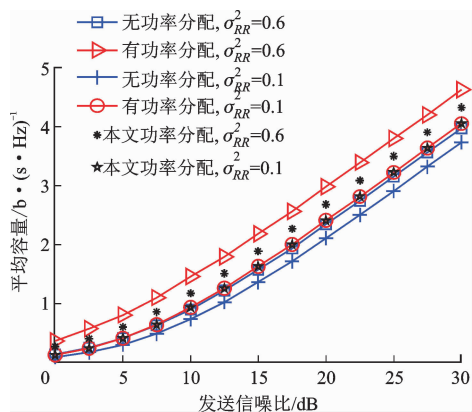


图4 $\sigma_{RR}^2 = 0.6$ 和 $\sigma_{RR}^2 = 0.1$ 时有功率分配与无功率分配的平均容量对比

图5考虑了 h_{R_i} 的信道方差为 $\sigma_{RR}^2 = 0.6$, 中继节点个数 $N=3$, 容量阈值 $R_{th} = 1$ b/(s · Hz) 的情况, 分别仿真了两阶段发送功率满足 $P_{S_1} = P_{S_2}$ 和发送功率分配参数 τ 优化后的系统中断概率。从图5可以看出: 中断概率在发送信噪比为 15 dB 时, 分配参数 τ 优化后的中断概率下降了 16% ; 同时, 在 $P_{S_1} = P_{S_2}$ 条件下, 中断概率的理论值与 Monte Carlo 仿真值在高发送信噪比时基本吻合, 验证了中断概率理论分析值的正确性。

在系统不同中继个数的条件下, 对 3 种中继选择算法进行了对比, 其中源节点 S 发送信噪比为 30 dB, 仿真结果如图6所示。由图6可以看出, 基于

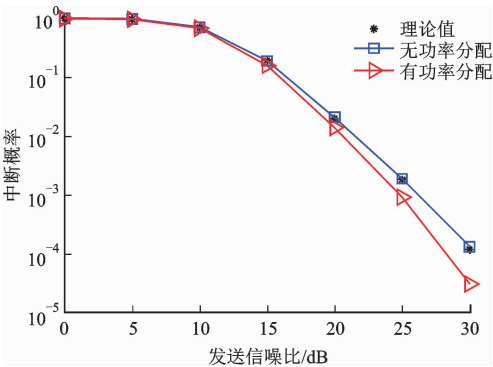


图 5 有功率分配与无功率分配中断概率的对比

节点功率的最大调和平均值选择算法与最大化目的节点接收信噪比的最优中继选择算法性能相近,并且这 2 种选择算法均优于基于节点功率的最好最差信道选择算法。此外,图 6 还仿真了随机选择中继进行协作的平均容量。仿真结果表明,在 $N=5$ 时,本文提出的中继选择方案比随机选择中继的系统容量性能提高了 30% 以上,随着中继个数的增加,其性能差异越明显。

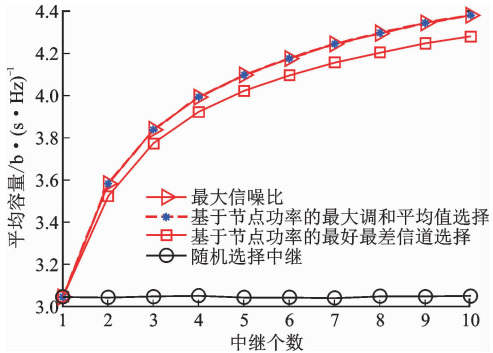


图 6 不同中继选择算法的对比

图 7 给出了在 h_{R_1} 的信道方差为 $\sigma_{RR}^2=0.1$ 时,在不同的发送信噪比条件下,系统中继个数分别为 N 为 1、2、3 和 5 所对应的中断概率理论分析值和仿真值。仿真结果表明,中断概率的理论值与仿真值基本吻合;同时,随着系统中继个数的增多,系统

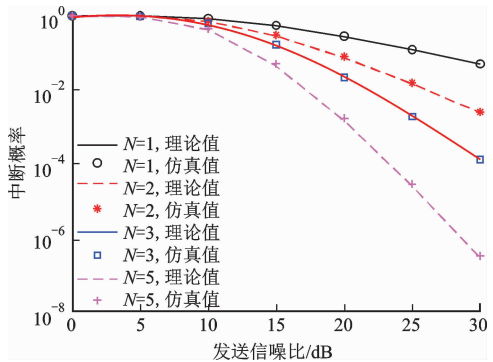


图 7 N 为 1、2、3、5 时的中断概率对比

的中断概率不断变小;并且,随着发送信噪比的增大,中断概率的理论值和仿真值曲线变陡,中断性能变化更明显。

5 结束语

本文在全双工多中继系统条件下,引入全双工中继自干扰链路信道采集的无线能量,为中继节点工作供能,并进行中继选择和发送功率分配。考虑了以最大化系统容量为目标的最优中继选择方法,仿真得到本文提出的中继选择方案比随机选择中继的系统容量性能在中继个数为 5 时提高 30% 以上;对传输第 1 阶段和第 2 阶段源节点向中继节点不同发送功率的分配参数进行优化,仿真结果表明,对发送功率分配参数优化与等功率分配相比,系统平均容量能够提升 10% 以上;对本方案最优中继选择方法的中断性能进行了分析,仿真结果表明,中断概率的理论值与仿真值基本吻合。

参考文献:

[1] KU Menglin, LI Wei, CHEN Yan, et al. Advances in energy harvesting communications: past, present, and future challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 18(2): 1384-1412.

[2] PONNIMBADUGE PERERA T D, JAYAKODY D N K, SHARMA S K, et al. Simultaneous wireless information and power transfer: recent advances and future challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(1): 264-302.

[3] 龙彦, 张晓倩, 方旭明, 等. 基于能量采集认知无线网中的资源分配方案研究 [J]. 通信学报, 2018, 39(9): 67-75.

LONG Yan, ZHANG Xiaoqian, FANG Xuming, et al. Resource allocation in cognitive radio network with energy harvesting [J]. Journal on Communications, 2018, 39(9): 67-75.

[4] 邱欣, 乔坤. 基于物联网系统的 NOMA 与 SWIFT 结合的研究 [J]. 电子技术应用, 2018, 44(9): 17-20, 23.

QIU Huan, QIAO Kun. Research on the combination of NOMA and SWIFT based on internet of things [J]. Application of Electronic Technique, 2018, 44(9): 17-20, 23.

[5] MEDEPALLY B, MEHTA N B. Voluntary energy harvesting relays and selection in cooperative wireless networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3543-3553.

- [6] MICHALOPOULOS D S, SURAWEEERA H A, SCHOBER R. Relay selection for simultaneous information transmission and wireless energy transfer: a tradeoff perspective [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(8): 1578-1594.
- [7] GAUTAM S, UBAIDULLA P. Relay selection and transceiver design for joint wireless information and energy transfer in cooperative networks [C] // 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1-5.
- [8] KRIKIDIS I. Relay Selection in wireless powered cooperative networks with energy storage [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(12): 2596-2610.
- [9] 田贤忠, 郭敏, 何佳存, 等. 能量采集协作中继网络多中继节点选择策略 [J]. *通信学报*, 2017, 38(Z2): 1-7.
TIAN Xianzhong, GUO Min, HE Jiacun, et al. Multi relay node selection strategy for energy capture collaborative relay network [J]. *Journal on Communications*, 2017, 38(Z2): 1-7.
- [10] GU Yifan, CHEN He, LI Yonghui, et al. Distributed multi-relay selection in accumulate-then-forward energy harvesting relay networks [J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2018, 2(1): 74-86.
- [11] 张中山, 张丹丹, 王兴. 全双工通信关键技术研究 [J]. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44(8): 951-964.
ZHANG Zhongshan, ZHANG Dandan, WANG Xing. Research on full duplex (FD) wireless communication techniques [J]. *Science China: Information Science*, 2014, 44(8): 951-964.
- [12] LIU Kuanghao, KUNG Telin. Performance improvement for RF energy-harvesting relays via relay selection [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(9): 8482-8494.
- [13] WANG Dexin, ZHANG Rongqing, CHENG Xiang, et al. Capacity-enhancing full-duplex relay networks based on power splitting (PS) SWIPT [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(6): 5446-5450.
- [14] RABIE K M, ADEBISI B, SUMAME M S. Half-duplex and full-duplex AF and DF relaying with energy-harvesting in log-normal fading [J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2017, 1(4): 468-480.
- [15] ZENG Yong, ZHANG Rui. Full-duplex wireless-powered relay with self-energy recycling [J]. *IEEE Wire-*

- less Communications Letters, 2015, 4(2): 201-204.
- [16] SU Yinjie, JIANG Lingge, CHEN He. Decode-and-forward relaying with full-duplex wireless information and power transfer [J]. *IET Communications*, 2017, 11(13): 2110-2115.
- [17] ORIKUMHI I, LEOW C Y, DING Zhiguo. Wireless information and power transfer in MIMO virtual full duplex relaying system [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(12): 11001-11010.
- [18] BLETSAS A, KHISTI A, REED D P, et al. A simple cooperative diversity method based on network path selection [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(3): 659-672.
- [19] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of integrals, series, and products [M]. New York, USA: Elsevier, 2007: 917.

[本刊相关文献链接]

- 李云凤, 王磊, 王志成. 采用幅度相移键控调制的分层空间调制算法. 2018, 52(8): 117-123. [doi: 10.7652/xjtuxb201808018]
- 颀孙少帅, 杨俊安, 刘辉, 等. 未知拓扑无线自组网络多节点干扰决策算法. 2018, 52(6): 91-97. [doi: 10.7652/xjtuxb201806014]
- 宋华伟, 金梁, 王旭. 无线网络物理层安全认证方法. 2018, 52(4): 105-110. [doi: 10.7652/xjtuxb201804015]
- 刘明骞, 李建英, 李兵兵, 等. 认知无线电 Underlay 模式下 MQAM 信号的调制识别. 2018, 52(2): 52-57. [doi: 10.7652/xjtuxb201802008]
- 孙跃, 夏金凤, 唐春森, 等. 采用元胞遗传算法的无线电能传输网路径寻优. 2017, 51(4): 30-36. [doi: 10.7652/xjtuxb201704005]
- 张喆, 达新宇, 刘慧军, 等. 卫星混合载波混沌相位扰码安全传输方案. 2017, 51(12): 42-48. [doi: 10.7652/xjtuxb201712007]
- 刘洲洲, 李士宁. 采用压缩感知和 GM(1,1) 的无线传感器网络异常检测方法. 2017, 51(2): 40-46. [doi: 10.7652/xjtuxb201702007]
- 李彬, 李泉, 张若南, 等. 无线组播网络中应用网络编码的动态组合重传算法. 2016, 50(12): 38-44. [doi: 10.7652/xjtuxb201612007]
- 李怡, 庞友嘉, 易克初, 等. 大容量宽带卫星通信系统的下行高效传输方法. 2017, 51(3): 98-104. [doi: 10.7652/xjtuxb201703017]
- 刘立, 张衡阳, 毛玉泉, 等. 变换域通信系统抗干扰编码幅度谱成型算法. 2017, 51(2): 91-96. [doi: 10.7652/xjtuxb201702015]

(编辑 刘杨)