

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201608044

非对称双向中继信道中断概率分析与功率分配策略

国 强, 孙嘉遥, 项建弘

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 为改善非对称瑞利衰落信道下双向放大转发中继系统的中断性能,提出一种新的最小化中断概率的功率分配方案. 引入非对称因子,通过理论分析给出传统三节点网络结构中 4 种非对称双向中继信道下系统中中断概率的闭合表达式,并通过仿真比较发现下行信道非对称系统中中断性能最差. 针对下行信道非对称系统,利用基于信道状态信息的用户节点功率分配方案来最小化中断概率,该方案中功率分配值为与非对称因子有关的分段函数,节点能根据信道状态的变化自适应调整发射功率. 仿真实验结果表明:提出的功率分配方案可以改善下行非对称双向中继系统的中断性能,与等功率分配方案相比,非对称因子越小,改善效果越好.

关键词: 双向中继;放大转发;非对称因子;中断概率;功率分配

中图分类号: TN 925 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)05-0128-06

Outage probability analysis and power allocation strategy for asymmetric two-way relay channel

GUO Qiang, SUN Jiayao, XIANG Jianhong

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: To improve the outage performance of a bidirectional amplify and forward relaying system in an asymmetric Rayleigh fading channel, a new power allocation scheme based on minimizing the outage probability is proposed. First, the asymmetry factor is introduced, and under the theoretical analysis, the closed outage probability expressions of four cases asymmetric two-way relay channel with traditional three nodes network structure is derived. Simulation results show that downlink asymmetry is the worst case. Furthermore, in order to minimize the downlink asymmetry system outage probability, a power allocation scheme based on channel state information is proposed. In this scheme, the power allocation is a piecewise function of the asymmetry factor. The node can adjust the transmission power adaptively according to the variation of the channel state. Simulation results show that the proposed power allocation scheme can improve the outage performance of the downlink asymmetric two-way relay system. Compared with the equal power allocation scheme, the smaller the asymmetry factor is, the better the effect is.

Keywords: two-way relay; amplify-and-forward; asymmetry factor; outage probability; power allocation

协作中继技术作为多天线技术的一种扩展,通过形成虚拟的 MIMO 技术获得协作分集,扩大信号传输范围,已经成为研究热点. 文献[1]中的放大转发(amplify-and-forward, AF)和解码转发(decode-and-forward, DF)两种中继协议已经表明,通过中继共享用户的天线,可以提高系统容量,降低系统随信道变化的敏感性. 然而,由于实际通信系统的半双工限制,协作中继在提高无线传输性能的同时也带来了频谱效率的损失. 为此,文献[2]提出了只需两个时隙即可完成信息交互的双向中继传输方案;文献[3]详细推导了 AF 模式和 DF 模式下双向中继系统的容量,并与单向系统的容量做了对比,研究表

明,双向中继较单向中继能够获得更高的吞吐量. 由于 DF 双向中继需在中继端进行复杂的额外操作,而 AF 协议只需对双向接入信号进行简单的功率控制,因而简单、易行的 AF 协议得到更多的关注. 针对双向 AF 中继系统,文献[4-5]研究了双向中继系统中单一用户的中断概率问题. 而在实际中,双向中继系统任意一个节点发生了中断,双向中继传输即为中断. 为此,文献[6-10]分析了双向中继中两个用户的联合中断概率问题. 但文献[6-8]的研究均是基于大信噪比假设,文献[9-10]只考虑系统具有相同的信道条件. 更进一步,文献[11-12]对信道具有互易特性但两端信道条件不对称的系统进行了中断概率分析. 为了优化系统性能,有研究人员^[7,9,11,13]对双向中继系统中的功率分配问题进行了研究. 但上述文献都只考虑了一种特殊的网络模

收稿日期: 2016-08-14
作者简介: 国 强(1972—),男,教授,博士生导师
通信作者: 孙嘉遥, sunjiayao@hrbeu.edu.cn

型,即系统上行阶段和下行阶段的各个信道具有相同的信道条件. 另外,文献[14]也指出非对称性对双向中继系统中的许多性能指标,如系统中断概率、误码率等,均有不同程度的影响. 对于非对称信道问题,文献[15]针对物理层网络编码在非对称双向中继信道中的误码率性能进行了分析. 但是,对非对称信道条件双向中继放大转发协议的中断概率性能未见报导.

基于此,本文考虑一般化的双向中继模型,即信道条件非对称,研究影响系统中断性能的最主要因素,从双向传输的角度,以降低非对称系统中断概率为目标来实现节点间的功率分配,达到系统中断性能的优化,并且仿真验证该方案对系统性能的改善效果.

1 非对称双向中继信道模型

1.1 传统三节点对称双向中继信道模型

首先给出传统三节点双向中继通信系统模型,中继节点处采取放大转发协议,系统建模如图1所示.

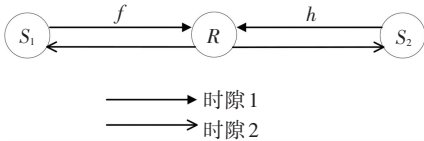


图1 传统三节点系统模型

Fig.1 Traditional three-node system model

图1中,假设两用户节点没有直接进行通信的信道,用户节点 S_1 与用户节点 S_2 通过中继 R 互相传递信号. 节点 S_1 向对方广播的信号为 x_1 ,节点 S_2 向对方广播的信号为 x_2 . 假设信道具有互易性, h, f 分别为 $S_1 - R$ 信道与 $S_2 - R$ 信道的信道衰落系数,两者相互独立. p_1, p_2, p_R 分别表示 S_1, S_2 和 R 的发射功率,且满足 $p_1 + p_2 + p_R \leq p_t$. n_1, n_2, n_R 分别表示 S_1, S_2 和 R 处的高斯白噪声(AWGN),设其均值为0,方差为1. 为了分析方便这里将 S_1 端与 S_2 端的距离归一化为1, $S_1 - R$ 信道链路长度为 d 且其满足 $0 < d < 1$.

1.2 非对称因子

在实际通信系统中,信道状况受很多因素影响,信道条件并不是理想的. 若只考虑信道中的小尺度衰落,可将信道视为对称的,但是若信道中还有阴影衰落、路径损耗等,此时各个信道条件的不同会导致信道非对称. 本节主要考虑系统含1条或2条不可靠信道,从而导致非对称的情况(此处不可靠信道是相对而言的,指的是其信道条件比其他信道差,后文亦同).

为了表示信道非对称程度,引入2个参数: a, b 称为非对称因子. 当系统中有1条不可靠信道时,该不可靠信道需要在信道衰落系数基础上乘以非对称因子 a ;当系统中有2条不可靠信道时,这2条不可靠信道都要乘以非对称因子 b . 由于信号在信道中传输只可能会产生衰落,所以 $0 < a, b \leq 1$,当其等于1时,即表示信道对称. a, b 越小,系统非对称程度越严重,传输性能越不可靠. 为比较不同情况下非对称双向中继通信系统的中断性能,介绍一下 a, b 之间的约束关系. 为了确保系统在含有1条不可靠信道与2条不可靠信道时,在传输过程中系统总的接收能量相同,有 $p + p + p + a^2p = p + p + b^2p + b^2p$ (其中 p 为各节点处的功率,假设均相等),化简得 $1 + a^2 = 2b^2$,进而得到 a, b 之间的关系为

$$b = \sqrt{(1 + a^2)/2}. \quad (1)$$

1.3 4种非对称双向中继信道中断概率比较

根据不可靠信道可能出现的情况,非对称双向中继系统可分为上行非对称、下行非对称、节点非对称和阶段非对称. 图2为4种非对称双向中继信道模型,除存在不可靠信道外,其余信道条件与1.1节中相同. 对于前3种模型只讨论用户节点 S_1 与中继 R 之间含非对称因子的情况,节点 S_2 与 R 之间情形分析相同.

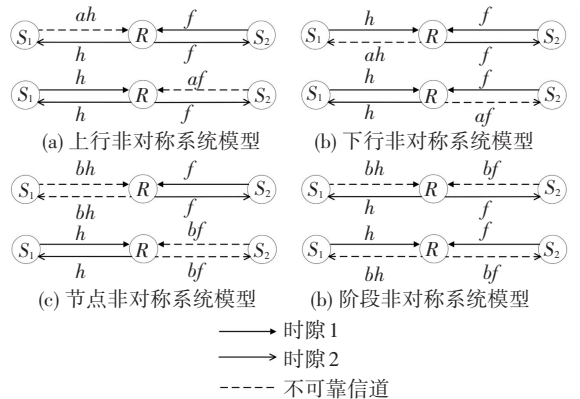


图2 4种非对称双向中继信道模型

Fig.2 Four cases of asymmetric two-way relay channel model

下面以上行非对称双向中继信道模型为例对系统中断性能进行分析. 第一时隙用户节点 S_1 与 S_2 同时向中继 R 发送各自信息,中继 R 处接收信号表示为

$$y_R = ah\sqrt{p_1}x_1 + f\sqrt{p_2}x_2 + n_R.$$

第二时隙中继 R 将接收信号放大之后广播至用户节点 S_1 和 S_2 ,两用户的接收信号为

$$y'_1 = akh^2\sqrt{p_1}x_1 + khf\sqrt{p_2}x_2 + khn_R + n_1,$$

$$y'_2 = akhf\sqrt{p_1}x_1 + kf^2\sqrt{p_2}x_2 + kfn_R + n_2.$$

其中 k 为中继采用放大转发协议的放大因子,其值为

$$k = \sqrt{\frac{p_R}{a^2 h^2 p_1 + f^2 p_2 + 1}}.$$

去除自身干扰后用户节点 S_1 与 S_2 的接收信噪比表示为

$$\begin{cases} \gamma_1 = \frac{p_2 p_R h^2 f^2}{(a^2 p_1 + p_R) h^2 + p_2 f^2 + 1}, \\ \gamma_2 = \frac{a^2 p_1 p_R h^2 f^2}{a^2 p_1 h^2 + (p_2 + p_R) f^2 + 1}. \end{cases}$$

其他 3 种情况的分析过程类似,只给出每种情形的用户端接收信噪比表达式.

下行非对称:

$$\begin{cases} \gamma_1 = \frac{a^2 p_2 p_R h^2 f^2}{(p_1 + a^2 p_R) h^2 + p_2 f^2 + 1}, \\ \gamma_2 = \frac{p_1 p_R h^2 f^2}{p_1 h^2 + (p_2 + p_R) f^2 + 1}. \end{cases} \quad (2)$$

节点非对称:

$$\begin{cases} \gamma_1 = \frac{b^2 p_2 p_R h^2 f^2}{(b^2 p_1 + b^2 p_R) h^2 + p_2 f^2 + 1}, \\ \gamma_2 = \frac{b^2 p_1 p_R h^2 f^2}{b^2 p_1 h^2 + (p_2 + p_R) f^2 + 1}. \end{cases}$$

阶段非对称(上):

$$\begin{cases} \gamma_1 = \frac{b^2 p_2 p_R h^2 f^2}{(b^2 p_1 + p_R) h^2 + b^2 p_2 f^2 + 1}, \\ \gamma_2 = \frac{b^2 p_1 p_R h^2 f^2}{b^2 p_1 h^2 + (b^2 p_2 + p_R) f^2 + 1}. \end{cases}$$

阶段非对称(下):

$$\begin{cases} \gamma_1 = \frac{b^2 p_2 p_R h^2 f^2}{(p_1 + b^2 p_R) h^2 + p_2 f^2 + 1}, \\ \gamma_2 = \frac{b^2 p_1 p_R h^2 f^2}{p_1 h^2 + (p_2 + b^2 p_R) f^2 + 1}. \end{cases}$$

中断概率是保证系统进行可靠信息传输的重要指标,可将其定义为当链路间信噪比 γ 小于信道要求的门限 γ_{th} 时,通信即会发生中断. 则系统中中断概率可表示为 $P_{out} = P(\gamma_1 < \gamma_{th} \cup \gamma_2 < \gamma_{th})$.

1.4 实验结果与分析

为了比较 4 种非对称信道中断性能,对其进行仿真分析. 考虑中继 R 位于两用户节点连线的中间位置 ($d = 0.5$), 各节点处功率均相等. 信道衰落系数 h, f 服从瑞利分布, 设 $u = h^2, v = f^2$, 则 u, v 分别服从均值为 Ω_h, Ω_f 且 $\Omega_h = d^{-\lambda}, \Omega_f = (1-d)^{-\lambda}$ 的指数分布, λ 为路径损耗因子, 这里取值为 4.

首先假设非对称因子 $a = 0.5$, 根据式(1)可计算出 $b = 0.7906$, 对非对称与对称双向中继系统的中断概率进行仿真, 如图 3 所示. 图 3 中系统的中断概率随信噪比的变化而变化, 可以看出: 下行非对称

中断概率最大; 其次为上行非对称; 阶段非对称(下)要好于前两者; 在各种非对称情况中, 阶段非对称(上)性能最好. 在给定系统信噪比的情况下, 分析非对称因子变化时, 对称和各种非对称情况下中断概率的仿真情形, 如图 4 所示. 从图 4 中可以看出: 上行非对称和下行非对称随 a 的增大中断概率在降低, 而节点非对称、阶段非对称的变化并不明显; 在整个变化区间内下行非对称性能最差, 上行非对称次之.

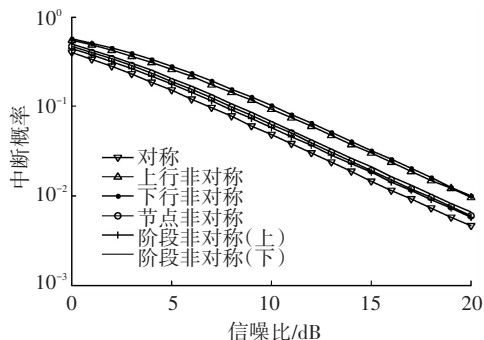


图 3 瑞利信道下 a, b 一定且信噪比变化时系统的中断概率对比

Fig.3 Comparison of the system outage probability in Rayleigh channel when a, b are constant and $R_{S/N}$ is variable

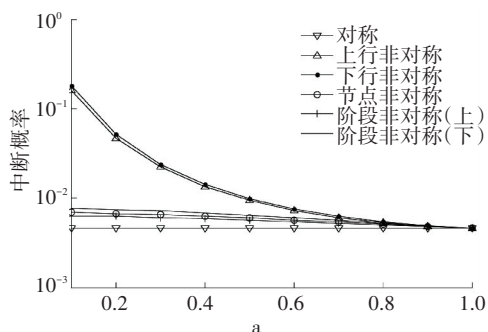


图 4 瑞利信道下信噪比一定且 a, b 变化时系统的中断概率对比

Fig.4 Comparison of the system outage probability in Rayleigh channel when $R_{S/N}$ is constant and a, b are variable

比较图 3、4, 下行非对称占用 1 条下行信道, 它的中断概率最大; 上行非对称占用 1 条上行信道, 性能次之; 阶段非对称(下)占用 2 条下行信道, 节点非对称占用 1 条上行信道与 1 条下行信道, 而阶段非对称(上)占用 2 条上行信道, 它的中断概率最小. 从中可以看出, 1 条不可靠信道比 2 条不可靠信道对系统的中断概率影响大; 下行不可靠信道比上行不可靠信道对系统的中断概率影响大; 下行信道越不可靠, 越可能发生中断, 对通信的影响越大. 通过对比可以看出下行信道的非对称对双向中继系统中中断性能影响最大, 下面将针对这一情形做进一步研究来改善系统的中断性能.

2 功率分配优化

针对上文对4种非对称双向中继信道中断概率的分析,得到一条下行信道为不可靠信道时对系统的中断性能影响最大,为了改善这一问题本节考虑在该情形下,利用信道状态信息的用户节点功率分配方案来优化系统的中断性能.系统模型见图2(b).

2.1 下行非对称双向中继信道中断概率分析

下面将详细推导上文中下行非对称情况中断概率具体表达式.根据式(2)用户端接收信噪比可进一步表示如下:

$$\gamma_1 = \frac{a^2 p_2 p_R uv}{(p_1 + a^2 p_R)u + p_2 v + 1} \approx \frac{a^2 p_2 p_R uv}{(p_1 + a^2 p_R)u + p_2 v} =$$

$$p_R \frac{a^2 u \frac{p_2 v}{p_1 + a^2 p_R}}{u + \frac{p_2 v}{p_1 + a^2 p_R}} < p_R \min\left(\frac{a^2 p_2 v}{p_1 + a^2 p_R}, a^2 u\right),$$

同理可得

$$\gamma_2 < p_R \min\left(\frac{p_1 u}{p_2 + p_R}, v\right).$$

设 $\psi_1 = \frac{p_2}{p_1 + a^2 p_R}, \psi_2 = \frac{p_1}{p_2 + p_R}$ 则 $\gamma_1 < p_R \min(a^2 \psi_1 v, a^2 u), \gamma_2 < p_R \min(\psi_2 u, v)$, 根据中断概率定义 $P_{\text{out}} = P(C < R) = P(\gamma < \gamma_{\text{th}})$ 可得

$$P_{\text{out}} = P(\gamma_1 < \gamma_{\text{th}} \cup \gamma_2 < \gamma_{\text{th}}) =$$

$$1 - P(\gamma_1 > \gamma_{\text{th}} \cap \gamma_2 > \gamma_{\text{th}}) =$$

$$1 - P(\min(\gamma_1, \gamma_2) > \gamma_{\text{th}}) =$$

$$1 - P(\min(a^2 \psi_1 v, \psi_2 u, a^2 u, v) > \frac{\gamma_{\text{th}}}{p_R}).$$

注意到此时 $\min(a^2 \psi_1 v, \psi_2 u, a^2 u, v)$ 可做分段处理, 等同于

$$\min(\psi_2 u, v), a^2 p_2 \geq p_1 + a^2 p_R,$$

$$\min(a^2 \psi_1 v, a^2 u), p_1 \geq a^2(p_2 + p_R),$$

$$\min(a^2 \psi_1 v, \psi_2 u), p_1 \leq a^2(p_2 + p_R), a^2 p_2 \leq p_1 + a^2 p_R.$$

设 $\psi'_1 = \min(a^2 \psi_1, 1), \psi'_2 = \min(\psi_2, a^2)$ 则

$$\min(a^2 \psi_1 v, \psi_2 u, a^2 u, v) = \min(\psi'_1 v, \psi'_2 u),$$

$$P(\min(a^2 \psi_1 v, \psi_2 u, a^2 u, v) > \gamma_{\text{th}}/p_R) =$$

$$P(\min(\psi'_1 v, \psi'_2 u) > \gamma_{\text{th}}/p_R) =$$

$$P(\psi'_2 u > \gamma_{\text{th}}/p_R, \psi'_2 u \leq \psi'_1 v) +$$

$$P(\psi'_1 v > \gamma_{\text{th}}/p_R, \psi'_1 v \leq \psi'_2 u) =$$

$$\int_{\gamma_{\text{th}}/p_R \psi'_2}^{\infty} \int_{\psi'_2 u / \psi'_1}^{\infty} f_v(x) dx f_u(u) du +$$

$$\int_{\gamma_{\text{th}}/p_R \psi'_1}^{\infty} \int_{\psi'_1 v / \psi'_2}^{\infty} f_u(x) dx f_v(v) dv =$$

$$e^{-\left(\frac{1}{\psi'_1 \Omega_f} + \frac{1}{\psi'_2 \Omega_h}\right) \frac{\gamma_{\text{th}}}{p_R}}.$$

$$\text{其中 } f_u(u) = \frac{1}{\Omega_h} e^{-\frac{u}{\Omega_h}}, f_v(v) = \frac{1}{\Omega_f} e^{-\frac{v}{\Omega_f}}$$

考虑在高信噪比区域 ($p_R \rightarrow \infty$) 可得中断概率的渐进表达式为

$$P_{\text{out}} = 1 - e^{-\left(\frac{1}{\psi'_1 \Omega_f} + \frac{1}{\psi'_2 \Omega_h}\right) \frac{\gamma_{\text{th}}}{p_R}} \approx$$

$$1 - \left(1 - \left(\frac{1}{\psi'_1 \Omega_f} + \frac{1}{\psi'_2 \Omega_h}\right) \frac{\gamma_{\text{th}}}{p_R}\right) =$$

$$\left(\frac{1}{\psi'_1 \Omega_f} + \frac{1}{\psi'_2 \Omega_h}\right) \frac{\gamma_{\text{th}}}{p_R}.$$

下面对 ψ'_1, ψ'_2 进行具体的分析: 当 $a^2 p_2 \geq p_1 +$

$$a^2 p_R \text{ 时, } \psi'_1 = 1, \psi'_2 = \psi_2 = \frac{p_1 - p_2 - p_R}{p_2 + p_R}, \text{ 则 } P_{\text{out}} =$$

$$\frac{\gamma_{\text{th}}}{p_R} \left(\frac{1}{\Omega_f} + \frac{p_2 + p_R}{(p_1 - p_2 - p_R) \Omega_h}\right), \text{ 由公式可以看出, } P_{\text{out}}$$

随 p_2 增大而增大, 当 $p_2 = (p_1 + a^2 p_R)/a^2$ 时, P_{out} 最小; 同理当 $p_1 \geq a^2(p_2 + p_R)$ 时, $p_1 = a^2(p_2 + p_R)$ 的情况下, P_{out} 最小; 由上分析当 $p_1 \leq a^2(p_2 + p_R)$,

$$a^2 p_2 \leq p_1 + a^2 p_R \text{ 时, } P_{\text{out}} = \frac{\gamma_{\text{th}}}{p_R} \left(\frac{p_1 + a^2 p_R}{a^2 p_2 \Omega_f} + \frac{p_2 + p_R}{p_1 \Omega_h}\right).$$

2.2 最小化中断概率的优化功率分配

本节研究在总功率一定的情况下,降低下行非对称系统中中断概率的各用户节点功率分配问题. 由上述分析,将根据以下三种情况进行讨论:

1) 当 $p_1 \leq a^2(p_2 + p_R), a^2 p_2 \leq p_1 + a^2 p_R$ 时, 由于上述理论推导的目标函数较为复杂, 这一部分将对其进行缩放, 得到中断概率的上界 $P_{\text{out}} = \frac{\gamma_{\text{th}}}{p_R} \left(\frac{p_1 + p_R}{a^2 p_2 \Omega_f} + \frac{p_2 + p_R}{p_1 \Omega_h}\right)$, 功率分配优化问题可近似的表述为

$$\min_{p_1, p_2, p_R} \frac{\gamma_{\text{th}}}{p_R} \left(\frac{p_1 + p_R}{a^2 p_2 \Omega_f} + \frac{p_2 + p_R}{p_1 \Omega_h}\right),$$

$$\text{s.t. } p_1 + p_2 + p_R = p_t,$$

$$p_1, p_2, p_R \geq 0.$$

得到功率分配的最优解为

$$p_1 = \frac{a\varepsilon}{a\varepsilon + \sqrt{2a\varepsilon} + 1} p_t,$$

$$p_2 = \frac{1}{a\varepsilon + \sqrt{2a\varepsilon} + 1} p_t,$$

$$p_R = \frac{\sqrt{2a\varepsilon}}{a\varepsilon + \sqrt{2a\varepsilon} + 1} p_t.$$

其中 $\varepsilon = \sqrt{\frac{\Omega_f}{\Omega_h}}$, 由 $p_1 \leq a^2(p_2 + p_R)$ 和 $a^2 p_2 \leq p_1 + a^2 p_R$, 计算得到 ε 的范围为 $a + a^3 - a^2 \sqrt{a^2 + 2} \leq \varepsilon \leq a + a^3 + a^2 \sqrt{a^2 + 2}$.

2) 当 $a^2 p_2 \geq p_1 + a^2 p_R$ 时, $\varepsilon \leq a + a^3 - a^2 \sqrt{a^2 + 2}$, 功率分配优化问题可表述为

$$\begin{aligned} \min_{p_1, p_2, p_R} & \frac{\gamma_{th}}{p_R} \left(\frac{1}{\Omega_f} + \frac{p_2 + p_R}{p_1 \Omega_h} \right), \\ \text{s.t. } & p_1 + p_2 + p_R = p_t, \\ & p_1, p_2, p_R \geq 0. \end{aligned}$$

得到功率分配的最优解为

$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{a^2 \varepsilon}{\sqrt{a^2 + 1} (\varepsilon \sqrt{a^2 + 1} + \sqrt{a^2 + \varepsilon^2})} p_t, \\ p_2 &= \frac{2\varepsilon + \sqrt{(a^2 + 1)(a^2 + \varepsilon^2)}}{2\sqrt{a^2 + 1} (\varepsilon \sqrt{a^2 + 1} + \sqrt{a^2 + \varepsilon^2})} p_t, \\ p_R &= \frac{\sqrt{a^2 + \varepsilon^2}}{2(\varepsilon \sqrt{a^2 + 1} + \sqrt{a^2 + \varepsilon^2})} p_t. \end{aligned}$$

此时系统中断概率的最小值出现在 $p_2 = (p_1 + a^2 p_R)/a^2$ 处.

3) 当 $p_1 \geq a^2(p_2 + p_R)$ 时, $\varepsilon \geq a + a^3 + a^2 \sqrt{a^2 + 2}$, 功率分配优化问题可表述为

$$\begin{aligned} \min_{p_1, p_2, p_R} & \frac{\gamma_{th}}{p_R} \left(\frac{p_1 + a^2 p_R}{a^2 p_2 \Omega_f} + \frac{1}{a^2 \Omega_h} \right), \\ \text{s.t. } & p_1 + p_2 + p_R = p_t, \\ & p_1, p_2, p_R \geq 0. \end{aligned}$$

得到功率分配的最优解为

$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{a^2}{a^2 + 1} p_t, \\ p_2 &= \frac{\sqrt{2a^2}}{(a^2 + 1)(\sqrt{2a^2} + \sqrt{a^2 + \varepsilon^2})}, \\ p_R &= \frac{\sqrt{a^2 + \varepsilon^2}}{(a^2 + 1)(\sqrt{2a^2} + \sqrt{a^2 + \varepsilon^2})} p_t. \end{aligned}$$

此时系统中断概率的最小值出现在 $p_1 = a^2(p_2 + p_R)$ 处.

3 性能仿真与分析

为了说明下行信道非对称系统的中断性能, 本节给出一些仿真结果. 信道参数设置与上节相同. 图 5 显示了在非对称因子取不同值时, 等功率分配情况下, 系统中断概率随信噪比变化的曲线. 从图 5 观察到, 随着非对称因子的增大, 系统的中断概率在降低, 与第 1 节中分析结果相同. 此外中断概率的理论值、近似值与仿真值比较吻合, 尤其是在大信噪比的情况下三者完全重合, 说明了理论分析的正确性.

图 6 分别仿真对比了 $d = 0.1$ 和 $d = 0.2$ 时系统的中断性能. 可以看出, 随着信噪比逐渐增大, 系统的中断概率降低, 并且在整个范围内本文优化功率

分配方案 (OPA) 的中断概率一直小于等功率分配方案 (UPA). 在信噪比 $R_{SN} = 20$ dB, $d = 0.1$ 时, OPA 在中断概率性能上较 UPA 相比约有 8 dB 的增益. 同时也可以看出, 图 6 中的理论值与仿真值是一致的, 验证了该功率分配方案的正确性.

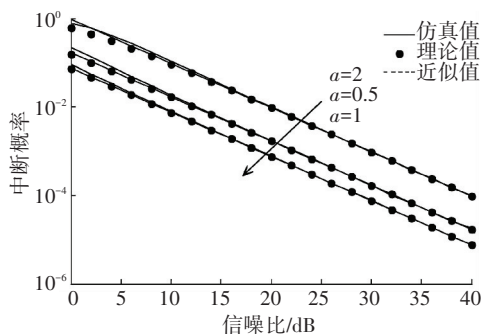


图 5 不同 a 时中断概率随信噪比变化曲线

Fig.5 Effect of a on the outage probability versus R_{SN}

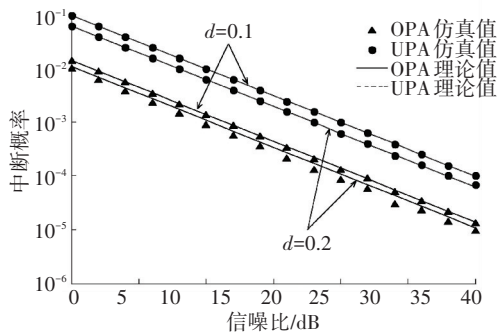


图 6 OPA 与 UPA 的中断性能比较 1

Fig.6 Comparison of outage performance between OPA and UPA 1

图 7 所示为 $d = 0.1$ 的条件下, 非对称因子取不同值时本文优化功率分配方案与等功率分配方案的对比图. 为了更清楚地看出仿真效果, 子图为优化功率分配方案仿真曲线的放大. 从图 7 可以看出, 非对称因子越小即下行信道越不可靠时, OPA 与 UPA 整体的中断概率都随着非对称因子的减小而增大. 同时随着非对称因子的减小, OPA 相比于 UPA 在中断概率一定的条件下功率增益增大. 说明该优化功率分配方案在下行非对称信道越不可靠时带来的性能增益越好, 改善了下行非对称信道的中断性能.

图 8 给出了系统中断概率与 d 之间的关系曲线, 不失一般性地将两个用户节点间距离归一化为 1. 可以看出, 本文优化功率分配方案较等功率分配方案有中断性能的优势, 尤其是在下行非对称信道条件下, 随着非对称因子的减小, 优势更加显著.

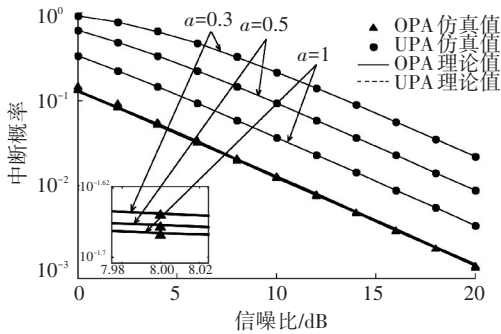


图 7 OPA 与 UPA 的中断性能比较 2

Fig.7 Comparison 2 of outage performance between OPA and UPA

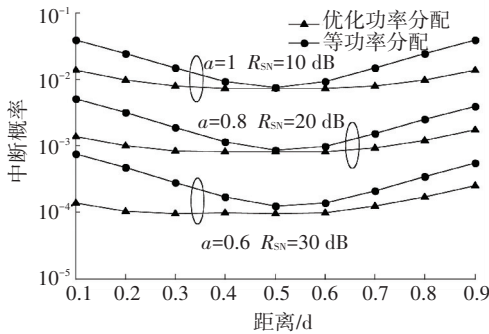


图 8 不同 d 时 OPA 与 UPA 的中断性能比较

Fig. 8 Comparison of outage performance between OPA and UPA in different d

从上述分析中可以得出,本文提出的优化功率分配方案改善了由下行信道非对称带来的系统中断性能下降的问题,但较等功率而言增加了计算的复杂性. CPU 的运行时间可以用来作为比较所提方案与等功率方案的复杂性. 对 2 种方案的运算时间进行计算,所用计算机平台为英特尔 i5 处理器、主频 2.50 GHz、32 位 Windows7 专业版下的 Matlab R2012a 仿真软件. 100 次计算的平均结果为:本方案平均运算时间 0.129 302 s,等功率方案平均运算时间 0. 123 191 s. 可以看出本文提出的优化功率分配方案较等功率分配方案在仿真时间上有所增加,时间代价很小,但本文方案可以有效的提高系统的中断性能.

为了进一步说明本文所提方案的优势,在 $\alpha = 1$ 的情况下与文献[5]中的优化功率分配方案进行对比,仿真效果如图 9 所示. 由图 9 可以看出,本文的优化功率分配方案的中断概率在 d 的取值范围内优于文献[5]中的方案,尤其是在中继节点非常靠近某一用户节点的情况下. 这是因为本文所提出的方案会根据信道增益的取值情况,将中断概率作为分段函数进行处理得到 3 种不同的优化区间分配值,对信道状态的变化具有更好的适应性,这也说明了本文提出的优化功率分配方案在信道对称的情况下也会有很好的性能.

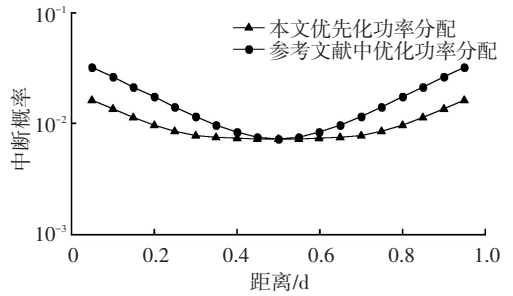


图 9 2 种方案中断概率与 d 的关系对比

Fig.9 The relationship between outage probability and d of two schemes

4 结 语

本文从双向传输的角度研究了基于放大转发协议的非对称双向中继系统中中断概率问题. 首先引入了非对称因子,考虑 4 种非对称情况,仿真分析了非对称信道影响系统中断性能下降的最主要原因,得出下行信道非对称对系统中断性能影响最大;然后针对下行非对称问题,在理论分析得出系统中断概率表达式和渐进表达式的基础上,以优化系统中断性能为目标,提出一种基于信道状态信息的用户节点功率分配方案,该方案虽然增加了运算量但对系统的中断性能有了很大的提升. 同时由仿真可以看出,较等功率分配方案相比,非对称因子越小,所提方案的性能优势越加显著,即使是在信道对称的情况下本文所提出的方案因对信道状态的变化具有更好的适应性,也会有中断性能的优势.

参考文献

[1] 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. DOI: 10.1109/TCOMM.2003.819238.

[2] RANKOV B, WITTNEBEN A. Spectral efficient protocols for half-duplex fading relay channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(2): 379-389. DOI: 10.1109/JSAC.2007.070213.

[3] NAM W, CHUNG S Y, LEE Y H. Capacity bounds for two-way relay channels[C]// International Zurich Seminar on Communications. Zurich: IEEE, 2008:144-147. DOI:10.1109/IZS.2008.4497296.

[4] LI Qiang, TING S H, PANDHARIPANDE A, et al. Adaptive two-way relaying and outage analysis[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(6): 3288-3299. DOI: 10.1109/TWC.2009.081213.

[5] 刘通, 陈前斌, 唐伦, 等. Two-way 中继系统中基于最小化中断概率的功率分配策略[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(3): 1108-1110. DOI:10. 3969/j.issn.1001-3695.2011.03.089.

LIU Tong, CHEN Qianbin, TANG Lun, et al. Optimal power allocation scheme based on minimizing outage probability in Two-way relay system[J]. Application Research of Computers, 2011, 28(3): 1108-1110. DOI:10. 3969/j.issn.1001-3695.2011.03.089.