

电力线和无线双媒质通信系统的自适应中继协议

史燕平^{1,2}, 王丽娇³, 李秀彩¹, 李朗¹, 黄鑫^{1,2}, 陈智雄³

(1. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 211006;

2. 南瑞集团有限公司 智能电网保护与运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211106;

3. 华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

摘要:综合考虑混合媒质通信和中继协作技术,研究了无线移动接入、无线和电力线并行传输的系统。利用多维对数正态近似算法以及终端信噪比的矩生成函数,分别推导出系统采用放大前传(AF)和译码前传(DF)时中断概率的闭合解析式;为了有效克服AF和DF中继协议的缺点,提出了自适应中继协议,即根据信道通信质量动态选择AF或者DF中继协议,并给出了具体的实现步骤;最后采用蒙特卡洛仿真验证了理论分析的有效性和可靠性。理论和仿真结果表明,与AF和DF中继协议相比,所提出的自适应中继协议在低信噪比区域和高信噪比区域均能获得较好的通信质量。

关键词:混合媒质通信;电力线通信;无线通信;分集合并;自适应中继协议;多维LogN近似算法;性能分析

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202102020

0 引言

电力线通信PLC(Power Line Communication)和无线通信技术在智能用电和家居物联网等领域具有广泛的应用前景^[1-2]。无线通信网络接入灵活、组网简单,然而无线通信易受到距离、障碍物(如墙壁)等的影响,信号衰落较大。电力线通信可以利用建筑中已有的电力线网络,不需要部署新的线路,建设成本较低,且信号传输不易受到建筑等环境因素的影响。但是电力线通信模块需要固定在插座上,无法实现移动接入。因此电力线和无线双媒质通信可以实现优势互补,节约建设成本,提升系统的整体性能^[3-5]。

为了实现远距离可靠通信,中继协作技术在国内外得到了广泛的研究与关注,该技术包括基于放大前传AF(Amplify and Forward)^[6]、译码前传DF(Decode and Forward)^[7]和分集合并^[3,5]等的物理层协作技术。文献[8]提出了选择式DF中继协议,具体而言,如果中继成功解码源信号,则将其转发给目的节点,否则源节点将重新发送信号。针对双向中继网络,文献[9]提出了一种AF与DF、全双工与半双工的自适应切换机制,但是门限值采用了固定值。文献[10]研究了多种中继协议的吞吐量性能和能源效率的权衡问题,其中涉及增量AF和增量DF中继协议,即根据目的端的反馈信息确定直传是否成功和中继是否需要转发信息。在该方案中,当目

的节点对源信号解码失败时,中继可以采用AF或者DF中继协议来转发信号,否则中继不参与协作通信。研究表明,非固定中继方案可以有效提高系统的频谱效率。

针对混合媒质通信技术,文献[11]研究了无线和电力线并行通信的硬件架构及其信号合并问题。文献[5]采用对数正态LogN(LogNormal)的室内无线和电力线信道模型,研究了基于AF和DF中继协议的无线和电力线双媒质协作通信的可靠性,但仅针对室内无线通信的场景,并不适用于室外无线通信或者其他协作通信衰落问题(如Nakagami衰落等)。文献[12]针对智能电网研究了无线和电力线中继网络架构,结果表明并行支路可通过优势互补获得分集增益,从而提高远距离通信能力。文献[13]考虑到Nakagami-LogN混合衰落场景,通过求解矩生成函数MGF(Moment Generating Function)方程组,将满足Gamma分布的无线支路信噪比近似为LogN分布,进而求解DF中继系统的中断概率和误码率性能。文献[14]提出一种非近似算法,直接利用无线和电力线支路信噪比的累积分布函数推导系统误码率、中断概率以及信道容量的闭合表达式。针对混合衰落AF中继系统,文献[15]提出了一种通用的性能分析算法,将信道衰落系数的平方近似为多维LogN分布,进而将混合衰落条件下的性能分析转变为LogN-LogN同分布下的LogN变量和近似计算问题。上述中继系统大多采用固定AF或者DF中继协议,因此研究自适应中继在混合通信中的应用具有一定的实用价值。

本文针对智能电网和家居物联网中无线和电力线混合组网的应用场景,首先建立了无线移动接入、无线和电力线并行传输的中继通信系统模型,目

收稿日期:2020-02-17;修回日期:2020-12-20

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(61601182);
河北省自然科学基金资助项目(F2017502059)

Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(61601182) and the Natural Science Foundation of Hebei Province(F2017502059)

的节点采用最大比合并MRC(Maximal Ratio Combining)方式;然后,提出了基于信噪比门限值的自适应中继转发方案,即根据信道质量动态选择AF或DF中继协议;最后利用二维LogN近似算法给出了系统输出信噪比的MGF,推导中继在采用不同转发协议时系统中断概率的闭合表达式,并结合理论性能计算和蒙特卡洛仿真,分析了中继协议、混合媒质通信以及功率分配对系统性能的影响规律。研究表明所提的自适应中继方案可在不增加系统复杂度的前提下获得最佳的通信质量,使整个系统能够在更宽的信噪比区间内获得相对最优的中断概率性能,在实际通信系统中具有重要的意义。

1 系统模型与信号处理

本文采用如图1所示的三节点、两跳的双媒质并行通信系统模型。图中, n_{WR} 和 n_{WD} 分别无线支路SR和RD的噪声; H_{WR} 、 H_{WD} 为无线信道衰落系数; n_{PD} 为电力线信道的加性噪声; H_{PD} 为电力线信道衰落系数;可移动接入的终端S和中继R之间进行无线通信,中继R和目的节点D之间进行无线和电力线并行通信。终端S在第1时隙以功率 P_S 通过无线信道向中继R发送信号 X_S ;中继R在第2时隙利用AF、DF或自适应中继AR(Adaptive Relay)方案对接收的信号进行处理,获得中继信号 X_R ,再分别以功率 P_{R1} 和 P_{R2} 通过无线和电力线并行信道将信号 X_R 发送至目的节点D,目的节点D采用MRC方式对接收到的信号进行合并。

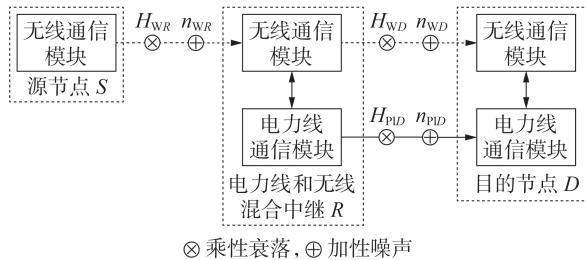


图1 基于中继转发的双媒质并行通信系统模型

Fig.1 Hybrid-media parallel communication system model based on relay forwarding

在无线移动接入、混合媒质并行传输的中继通信系统中,源节点包含无线通信模块,而中继节点和目的节点同时包含无线通信和电力线通信模块,中继处的无线通信和电力线通信模块可以进行信息交互。智能电网面临的主要挑战是存在强噪声和干扰,而无线和电力线并行通信获得的分集增益可以有效提高系统的可靠性,满足智能电网的通信要求。另外,混合媒质并行通信系统同样可以应用到智能家居中,解决了固定智能设备和传感器需要连接到配电网才能实际投入使用的问题。

系统模型中,3条通信支路都受到乘性衰落和加性噪声的影响,具体如下。

(1)无线支路。第1时隙和第2时隙的无线支路SR和RD中,噪声 n_{WR} 和 n_{WD} 满足正态分布 $N(0, N_w)$,其中 N_w 为无线信道噪声功率。无线信道衰落系数 $H_{WI}(I \in \{R, D\})$ 满足Nakagami分布。 m_I 为Nakagami分布参数,且 $m_I \geq 0.5$, $\Omega_I = E(|H_{WI}|^2)$ 表示衰落幅度的均值,为了保证衰落不改变接收信号的平均功率,对 Ω_I 进行归一化处理,即 $\Omega_I = 1$ 。易知, $|H_{WI}|^2$ 满足Gamma分布 $G(m_I, \Omega_I/m_I)$ 。定义第1、2时隙无线信道的平均信噪比分别为 $\Delta_{WR} = P_S/N_w$ 、 $\Delta_{WD} = P_{R1}/N_w$,则无线支路的瞬时信噪比为:

$$\gamma_{WI} = |H_{WI}|^2 \Delta_{WI} \quad (1)$$

根据Gamma函数的性质,当 Δ_{WI} 为常数时,无线支路的瞬时信噪比满足 $\gamma_{WI} \sim G(m_I, \Delta_{WI}\Omega_I/m_I)$ 。

(2)电力线支路。第2时隙的电力线支路RD中,电力线信道衰落系数 H_{PD} 满足LogN分布 $\text{LogN}(\mu_{PD}, \sigma_{PD}^2)$,其中 μ_{PD} 和 σ_{PD}^2 分别为 $\ln H_{PD}$ 的均值和均方差(单位为dB)。对信道衰落包络能量进行归一化处理,即 $E(|H_{PD}|^2) = \exp(2\mu_{PD} + 2\sigma_{PD}^2) = 1$,则有 $\mu_{PD} = -\sigma_{PD}^2$ 。

电力线信道的加性噪声 n_{PD} 采用伯努利-高斯噪声模型,该模型由背景噪声和脉冲噪声组成,其概率密度函数PDF(Probability Density Function) $f(n_{PD})$ 具有以下形式:

$$f(n_{PD}) = (1-p)N(0, N_G) + pN(0, N_G + N_I) \quad (2)$$

其中, p 为脉冲噪声出现的概率; N_G 和 N_I 分别为背景噪声和脉冲噪声的功率。只存在背景噪声时,噪声的瞬时概率为 $p_0 = 1-p$;同时存在背景和脉冲噪声时,瞬时噪声概率为 $p_1 = p$ 。电力线信道的平均总噪声功率为 $N_{PI} = N_G + pN_I$ 。进一步简化噪声模型,定义 $K = N_I/N_G$ 表示脉冲噪声与背景噪声功率之比。

定义 $\Delta_{PI0} = P_{R2}/N_G$ 和 $\Delta_{PI1} = P_{R2}/(N_G + N_I)$ 分别为电力线信道只存在背景噪声和同时存在背景噪声及脉冲噪声时的平均信噪比,则电力线支路RD的瞬时信噪比为:

$$\gamma_{PDj} = |H_{PD}|^2 \Delta_{PIj} \quad j=0, 1 \quad (3)$$

其中, $j=0$ 和 $j=1$ 分别表示仅存在背景噪声和同时存在背景噪声、脉冲噪声的情况; γ_{PDj} 为电力线支路RD在情况 j 下的瞬时信噪比。

根据LogN分布的性质可以看出,在 Δ_{PI0} 和 Δ_{PI1} 为常数的情况下, γ_{PD0} 和 γ_{PD1} 也满足LogN分布,即

$$\gamma_{\text{PlDj}} \sim \text{LogN}(2\mu_{\text{PlD}} + \ln \Delta_{\text{Plj}}, 4\sigma_{\text{PlD}}^2)。$$

2 固定 AF 和 DF 中继协议的理论性能分析

2.1 基于 AF 中继协议的双媒质并行通信

两跳 AF 中继系统的输出信噪比满足如下统一表达式^[15]:

$$\begin{cases} \gamma_{\text{WW}}^{\text{AF}} = \left(\frac{1}{\gamma_{\text{WR}}} + \frac{1}{\gamma_{\text{WD}}} \right)^{-1} \\ \gamma_{\text{WP}}^{\text{AF}} = \left(\frac{1}{\gamma_{\text{WR}}} + \frac{1}{\gamma_{\text{PD}}} \right)^{-1} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\gamma_{\text{WW}}^{\text{AF}}$ 、 $\gamma_{\text{WP}}^{\text{AF}}$ 分别为无线-无线 AF 中继通信、无线-电力线 AF 中继通信在目的节点 D 的信噪比; γ_{PlD} 为电力线支路 RD 的瞬时信噪比。

目的节点 D 对并行链路的信号采用 MRC 方式后, 系统的总输出信噪比 γ^{AF} 为:

$$\gamma^{\text{AF}} = \gamma_{\text{WW}}^{\text{AF}} + \gamma_{\text{WP}}^{\text{AF}} \quad (5)$$

则系统的瞬时互信息量 I^{AF} 为:

$$I^{\text{AF}} = \frac{1}{2} \ln(1 + \gamma^{\text{AF}}) \quad (6)$$

采用 MRC 方式时, 系统的总输出信噪比为 2 条并行支路信噪比之和。本文采用多维 LogN 分布近似算法^[15], 在满足独立 Nakagami 分布的混合无线 AF 中继链路以及满足 Nakagami-LogN 分布的无线-电力线 AF 中继链路中, 假设节点 D 处的信噪比均满足二维 LogN 分布, 进而求解出在 AF 中继协作和双媒质并行通信的条件下, 目的节点采用 MRC 方式时, 系统输出信噪比的二维 LogN 分布参数及其 MGF 表达式。

已知 $|H_{\text{WI}}|^2$ 满足 Gamma 分布, 根据 Gamma 分布的性质, 当 Δ_{WI} 为常数时, $|H_{\text{WI}}|^2 \Delta_{\text{WI}} \sim G(m_I, \Delta_{\text{WI}} \Omega_I / m_I)$ 。可知 $\left(|H_{\text{WI}}|^2 \Delta_{\text{WI}}\right)^{-1}$ 的 MGF 为:

$$M_{\text{WI}}(s) = \frac{2}{\Gamma(m_I)} \left(\frac{m_I}{\Omega_I \Delta_{\text{WI}}} \right)^{0.5m_I} K_{m_I} \left(2 \sqrt{\frac{sm_I}{\Omega_I \Delta_{\text{WI}}}} \right) \quad (7)$$

其中, $\Gamma(\cdot)$ 为伽玛函数; $K_V(\cdot)$ 为第二类变形贝塞尔函数。

本文采用二维 LogN 近似算法, 假设 $(\gamma_{\text{WW}}^{\text{AF}})^{-1} = \left(|H_{\text{WR}}|^2 \Delta_{\text{WR}}\right)^{-1} + \left(|H_{\text{WD}}|^2 \Delta_{\text{WD}}\right)^{-1}$ 满足二维 LogN 分布, 即 $(\gamma_{\text{WW}}^{\text{AF}})^{-1} \sim \sum_{t=1}^2 \theta_t \text{LogN}(\mu_{\text{WI}}, \sigma_{\text{WI}}^2)$, 其中 $\theta_t (t \in \{1, 2\})$ 为每一维 LogN 变量占据的权重, 且 $\theta_1 + \theta_2 = 1$, μ_{WI} 和 σ_{WI}^2 分别为高斯指数的均值和方差。通过 Gauss-Hermite 级数方法对 LogN 变量的 MGF 进行积分处理, 可得到 $(\gamma_{\text{WW}}^{\text{AF}})^{-1}$ 的 MGF 表达式为:

$$M_{\text{WW}}(s) = \sum_{t=1}^2 \theta_t \left[\sum_{m=1}^M \frac{\omega_m}{\sqrt{\pi}} \exp \left(-s \cdot \exp \left(\sqrt{2\sigma_{\text{WI}}^2} a_m + \mu_{\text{WI}} \right) \right) \right] \quad (8)$$

其中, ω_m 和 a_m 分别为 Gauss-Hermite 公式的权重及其零点; M 为 ω_m 与 a_m 的数量^[16]。

2 个变量和的 MGF 等于 2 个变量 MGF 的乘积, 则 $(\gamma_{\text{WW}}^{\text{AF}})^{-1}$ 的 MGF 又可以表示为:

$$M_{\text{WR}}(s) M_{\text{WD}}(s) = \sum_{t=1}^2 \theta_t \left[\sum_{m=1}^M \frac{\omega_m}{\sqrt{\pi}} \exp \left(-s \cdot \exp \left(\sqrt{2\sigma_{\text{WI}}^2} a_m + \mu_{\text{WI}} \right) \right) \right] \quad (9)$$

选择 5 个固定的 s 值 $s_1 \sim s_5$, 可获得关于 θ_t 、 μ_{WI} 和 σ_{WI}^2 的方程组, 利用 MATLAB 中的 fsolve 函数可以求解出 θ_t 、 μ_{WI} 和 σ_{WI}^2 。本文旨在求得系统输出信噪比的 MGF, 因此以近似前后的 MGF 曲线差异度最小为目标进行数学建模求解最佳的 $s_1 \sim s_5$ 组合, 如式(10)所示。

$$\begin{cases} \min_{s_1 \sim s_5} \sum_{k=1}^L \left(M_{\text{WR}}(s_k, m_R, \Omega_R) M_{\text{WD}}(s_k, m_D, \Omega_D) - M_{\text{WW}}(s_k, \theta_t, \mu_{\text{WI}}, \sigma_{\text{WI}}^2) \right)^2 \\ \text{s.t.} \begin{cases} M_{\text{WR}}(s) M_{\text{WD}}(s) = \sum_{t=1}^2 \theta_t \left[\sum_{m=1}^M \frac{\omega_m}{\sqrt{\pi}} \exp \left(-s \cdot \exp \left(\sqrt{2\sigma_{\text{WI}}^2} a_m + \mu_{\text{WI}} \right) \right) \right] \\ s_k = 0.01 + 0.05(k-1) \quad k = 1, 2, \dots, L \\ s_r > 0 \quad r \in \{1, 2, 3, 4, 5\} \\ 0 < \theta_t < 1, \sigma_{\text{WI}}^2 > 0, t \in \{1, 2\}, \theta_1 + \theta_2 = 1 \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

其中, s_k 为 MGF 方程中可调变量 s 的第 k 个采样值, 0.05 表示采样间隔, 可调变量 s 从 0.01 开始等间隔采样; L 为 MGF 的总采样点数, 本文取 $L = 100$ 。综合利用遗传算法和 fmincon 指令得到最优的 s 值组合以及对应的二维 LogN 分布参数^[15]。

同理, 在无线-电力线 AF 中继通信中, 采用二维 LogN 近似算法, 即 $(\gamma_{\text{WP}}^{\text{AF}})^{-1} \sim \sum_{z=1}^2 \rho_z \text{LogN}(\mu_{\text{Pz}}, \sigma_{\text{Pz}}^2)$, 其中 $\rho_z (z \in \{1, 2\})$ 为每一维 LogN 变量的权重, 且 $\rho_1 + \rho_2 = 1$, μ_{Pz} 和 σ_{Pz}^2 分别为高斯指数的均值和方差。固定电力线瞬时噪声概率 $p_j (j \in \{0, 1\})$, 可得 $\left(|H_{\text{PlD}}|^2 \Delta_{\text{Plj}}\right)^{-1}$ 和 $(\gamma_{\text{WPj}}^{\text{AF}})^{-1}$ 的 MGF 表达式分别如式(11)和式(12)所示。

$$M_{\text{PlDj}}(s) = \sum_{m=1}^M \frac{\omega_m}{\sqrt{\pi}} \exp \left(-s \cdot \exp \left(\sqrt{2\sigma_{\text{Pj}}^2} a_m - \mu_{\text{Pj}} \right) \right) \quad (11)$$

$$M_{\text{WPj}}(s) = \sum_{z=1}^2 \rho_z \left[\sum_{m=1}^M \frac{\omega_m}{\sqrt{\pi}} \exp \left(-s \cdot \exp \left(\sqrt{2\sigma_{\text{Pz}}^2} a_m + \mu_{\text{Pz}} \right) \right) \right] \quad (12)$$

其中, $\mu_{Dj} = 2\mu_{pD} + \ln \Delta_{pD}$ 、 $\sigma_{Dj}^2 = 4\sigma_{pD}^2$ 为不同瞬时噪声概率下电力线支路信噪比的分布参数; ρ_{jz} 为不同瞬时噪声概率下, 每一维 LogN 变量的权重; $\mu_{p_{jz}}$ 和 $\sigma_{p_{jz}}^2$ 分别为不同瞬时噪声概率下 $(\gamma_{WPj}^{AF})^{-1}$ 的均值和方差。

同理可知, $(\gamma_{WPj}^{AF})^{-1}$ 的 MGF 可表示为:

$$M_{WR}(s)M_{pDj}(s) = \sum_{z=1}^2 \rho_{jz} \left[\sum_{m=1}^M \frac{\omega_m}{\sqrt{\pi}} \exp \left(-s \cdot \exp \left(\sqrt{2\sigma_{p_{jz}}^2} a_m + \mu_{p_{jz}} \right) \right) \right] \quad (13)$$

选择 5 个固定的 s 值, 得到关于 ρ_{jz} 、 $\mu_{p_{jz}}$ 和 $\sigma_{p_{jz}}^2$ 的方程组, 进而求解出在不同噪声概率条件下近似后的二维 LogN 的分布参数。

由上述 2 次近似过程得到目的节点 D 处的信噪比 γ_{WW}^{AF} 、 γ_{WP}^{AF} 的二维 LogN 分布参数分别如式 (14)、(15) 所示。

$$\gamma_{WW}^{AF} \sim \sum_{t=1}^2 \theta_t \text{LogN}(-\mu_{Wt}, \sigma_{Wt}^2) \quad (14)$$

$$\gamma_{WP}^{AF} \sim \sum_{j=0}^1 \sum_{z=1}^2 p_j \left(\rho_{jz} \text{LogN}(-\mu_{p_{jz}}, \sigma_{p_{jz}}^2) \right) \quad (15)$$

目的节点采用 MRC 方式, 系统总输出信噪比 γ^{AF} 的 MGF 可表示为式 (16) 所示形式。

$$M_{\gamma^{AF}}(s) = M_{\gamma_{WW}^{AF}}(s) M_{\gamma_{WP}^{AF}}(s) \quad (16)$$

$$M_{\gamma_{WW}^{AF}}(s) = \sum_{t=1}^2 \sum_{m=1}^M \theta_t \frac{\omega_m}{\sqrt{\pi}} \exp \left(-s \cdot \exp \left(\sqrt{2\sigma_{Wt}^2} a_m - \mu_{Wt} \right) \right) \quad (17)$$

$$M_{\gamma_{WP}^{AF}}(s) = \sum_{j=0}^1 p_j \left[\sum_{z=1}^2 \sum_{m=1}^M \rho_{jz} \frac{\omega_m}{\sqrt{\pi}} \exp \left(-s \cdot \exp \left(\sqrt{2\sigma_{p_{jz}}^2} a_m - \mu_{p_{jz}} \right) \right) \right] \quad (18)$$

当系统信息速率小于要求的最低速率门限 γ_{th} 时, 系统的正常通信将会中断。利用 γ^{AF} 的 MGF 即可计算系统的中断概率性能 P_{out}^{AF} , 其表达式为:

$$P_{out}^{AF} = \zeta^{-1} \left(M_{\gamma^{AF}}(s) / s \right) \Big|_{\gamma_{th}} \quad (19)$$

其中, $\zeta^{-1}(\cdot)$ 表示拉普拉斯逆变换, 可通过必要的变形获得如式 (20) 所示的闭合表达式。

$$P_{out}^{AF} = \frac{2^{-Q} \exp(0.5C)}{\gamma_{th}} \times \sum_{q=0}^Q C(Q, q) \sum_{n=0}^{N+q} \frac{(-1)^n}{\beta_n} \times \text{Re} \left\{ \frac{M_{\gamma^{AF}} \left(\frac{C+j2\pi n}{2\gamma_{th}} \right)}{\frac{C+j2\pi n}{2\gamma_{th}}} \right\} + E(C, N, Q) \quad (20)$$

其中, $\beta_0 = 2$; $\beta_n = 1$ (n 为正整数); $C(Q, q)$ 表示从 Q 个元素中取 q 个元素的组合数量; 数值估计的精度由数值 C 、 N 和 Q 决定, 可通过整体截断误差 $E(C, N, Q)$

进行估算。

2.2 基于 DF 中继协议的双媒质并行通信

基于 DF 中继协议的双媒质协作系统中, 目的节点采用 MRC 之后, 系统的输出信噪比 γ^{DF} 为:

$$\gamma^{DF} = \gamma_{WD} + \gamma_{pD} \quad (21)$$

则 DF 中继系统的瞬时互信息量 I^{DF} 为:

$$I^{DF} = \frac{1}{2} \min \left\{ \ln(1 + \gamma_{WR}), \ln(1 + \gamma^{DF}) \right\} \quad (22)$$

同理可知, 采用 DF 中继协议时, 系统输出信噪比 γ^{DF} 的 MGF 可表示为:

$$M_{\gamma^{DF}}(s) = M_{\gamma_{WD}}(s) M_{\gamma_{pD}}(s) \quad (23)$$

固定电力线支路的瞬时噪声概率 p_j , 根据式 (1) 和式 (3) 可得到 γ_{WI} 和 γ_{pD} 的分布参数, 进而可求得 γ_{WI} 和 γ_{pD} 的 MGF 表达式分别如式 (24) 和式 (25) 所示。

$$M_{\gamma_{WI}}(s) = (1 + \Delta_{WI} \Omega_I / m_I)^{-m_I} \quad (24)$$

$$M_{\gamma_{pD}}(s) = \sum_{j=0}^1 \sum_{m=1}^M p_j \frac{\omega_m}{\sqrt{\pi}} \exp \left(-s \cdot \exp \left(\sqrt{2\sigma_{Dj}^2} a_m - \mu_{Dj} \right) \right) \quad (25)$$

根据 DF 中继协议的互信息量表达式, DF 中继系统的平均中断概率为:

$$P_{out}^{DF} = 1 - (1 - P_{out1}^{DF})(1 - P_{out2}^{DF}) \quad (26)$$

其中, P_{out1}^{DF} 和 P_{out2}^{DF} 分别为 DF 中继系统中第 1 跳 (信噪比为 γ_{WR}) 和第 2 跳 (信噪比为 γ^{DF}) 的中断概率。

利用 MGF 计算两跳的中断概率, 另外考虑到电力线信道的噪声概率, 则有:

$$P_{out1}^{DF} = \frac{2^{-Q} \exp(0.5C)}{\gamma_{th}} \times \sum_{q=0}^Q C(Q, q) \sum_{n=0}^{N+q} \frac{(-1)^n}{\beta_n} \times \text{Re} \left\{ \frac{M_{\gamma_{WR}} \left(\frac{C+j2\pi n}{2\gamma_{th}} \right)}{\frac{C+j2\pi n}{2\gamma_{th}}} \right\} + E(C, N, Q) \quad (27)$$

$$P_{out2}^{DF} = \frac{2^{-Q} \exp(0.5C)}{\gamma_{th}} \times \sum_{q=0}^Q C(Q, q) \sum_{n=0}^{N+q} \frac{(-1)^n}{\beta_n} \times \text{Re} \left\{ \frac{M_{\gamma^{DF}} \left(\frac{C+j2\pi n}{2\gamma_{th}} \right)}{\frac{C+j2\pi n}{2\gamma_{th}}} \right\} + E(C, N, Q) \quad (28)$$

3 自适应中继协议的理论性能分析

单一的 AF 和 DF 中继协议各有优缺点: AF 中继协议的硬件结构简单, 但是在对信号处理过程中放大了第 1 跳的噪声; DF 中继协议直接对接收到的信

号进行硬判决,然而不正确的译码会造成错误传播。这2种固定中继模式在不同信道质量下的传输效果有很大区别,若能在信道质量已知的前提下采用最佳模式进行转发,则可以大幅度提高通信质量。因此,为了充分发挥AF和DF中继协议的通信优势,并避免两者各自的缺点,本文提出了一种基于信噪比门限值的自适应中继算法。该算法假定3条独立支路的信道平均信噪比在短时间内稳定且相等,利用信道估计算法获得信道衰落系数 m_R 、 m_D 和 σ_{pID} 、电力线通信脉冲噪声参数 p 和 K ,以及信道当前的平均信噪比 Δ_τ ,然后根据 Δ_τ 与门限值 Δ_{th} 的关系来动态选择AF或者DF中继协议。自适应中继算法的完整实现流程见附录A图A1,具体步骤如下。

(1)假设该系统模型涉及的3条通信支路的平均信噪比在短时间内稳定且相等,在源节点发送信号之前中继利用导频或者训练序列等信道估计算法获得信道衰落和噪声参数,该系统在采用AF和DF中继协议时的通信质量完全取决于信道的平均信噪比 Δ 。

(2)分别计算出采用AF和DF中继协议时,系统中断概率的闭合解析式,如式(20)和式(26)所示。建立以信道平均信噪比作为变量的方程 $P_{out}^{AF}(\Delta) = P_{out}^{DF}(\Delta)$;然后利用遗传算法、差分优化算法或者MATLAB中的solve函数求解该方程,得到当前信道条件下自适应中继算法的门限值 Δ_{th} 。

(3)系统的通信质量随着信道平均信噪比的增加而提高,可以推测AF和DF中继协议的中断概率是关于 Δ 的单调函数。任取一个小于门限值的平均信噪比,计算并比较该平均信噪比对应的AF和DF中继系统的中断概率:若 $P_{out}^{DF} < P_{out}^{AF}$,则在低信噪比区域选择DF中继协议,否则采用AF中继协议。该判据将作为自适应中继算法的通信原则。

(4)中继根据当前信道的平均信噪比 Δ_τ 与门限值 Δ_{th} 的关系,确定是采用AF还是DF中继协议处理接收到的源信号,从而获得中继信号。通过并行信道将中继信号转发到目的节点D,目的节点采用MRC对2条独立支路的信号进行合并。

采用自适应中继算法后,系统的输出信噪比为:

$$\gamma^{AR} = \begin{cases} \gamma_{WD} + \gamma_{PID} & \Delta_\tau < \Delta_{th} \\ \gamma_{WW}^{AF} + \gamma_{WP}^{AF} & \Delta_\tau \geq \Delta_{th} \end{cases} \quad (29)$$

系统的瞬时互信息量 I^{AR} 为:

$$I^{AR} = \begin{cases} \frac{1}{2} \min \{ \ln(1 + \gamma_{WR}), \ln(1 + \gamma^{DF}) \} & \Delta_\tau < \Delta_{th} \\ \frac{1}{2} \ln(1 + \gamma^{AF}) & \Delta_\tau \geq \Delta_{th} \end{cases} \quad (30)$$

则自适应中继系统中断概率的表达式为:

$$P_{out}^{AR} = \begin{cases} P_{out}^{AF} & \Delta_\tau < \Delta_{th} \\ P_{out}^{DF} & \Delta_\tau \geq \Delta_{th} \end{cases} \quad (31)$$

本文所提自适应中继算法可以根据不同的环境选择最佳传输协议,通过选取合理的门限值动态地选择最佳模式;且算法是在固定中继协议的基础上提出的,不需要额外增加硬件电路的复杂度,这在实际的中继网络,尤其是在大型的多中继系统中非常重要。

4 仿真结果与分析

为了验证理论公式的准确性,采用MATLAB进行蒙特卡洛仿真,并与数值计算结果进行对比分析。为不失一般性,在仿真和理论计算过程中,系统模型中的参数均采用以下默认设置:功率归一化处理,系统的总功率为3 W, $P_S = P_{R1} = P_{R2} = 1$ W;假设电力线和无线信道的平均信噪比相等,均为 Δ ,则平均噪声功率为 $N_0 = 1/\Delta$,无线支路SR和RD的噪声功率均为 N_0 ,电力线支路的背景噪声、脉冲噪声功率分别为 $N_G = N_0/(1+pK)$ 、 $N_I = KN_G$;在二项伯努利-高斯噪声模型中令 $p = 0.1$ 、 $K = 20$;系统中断门限值 $\gamma_{th} = 0.1$ 。

针对图1所示的系统模型,图2给出了采用AF、DF中继协议时,系统在不同的信道衰减参数下所获得的理论和仿真中断概率曲线。由图可知:在不同的信道衰减条件下,AF和DF中继系统中断概率的理论结果始终与仿真结果吻合,证明了本文理论推导的可靠性;AF和DF中继系统的中断概率是关于

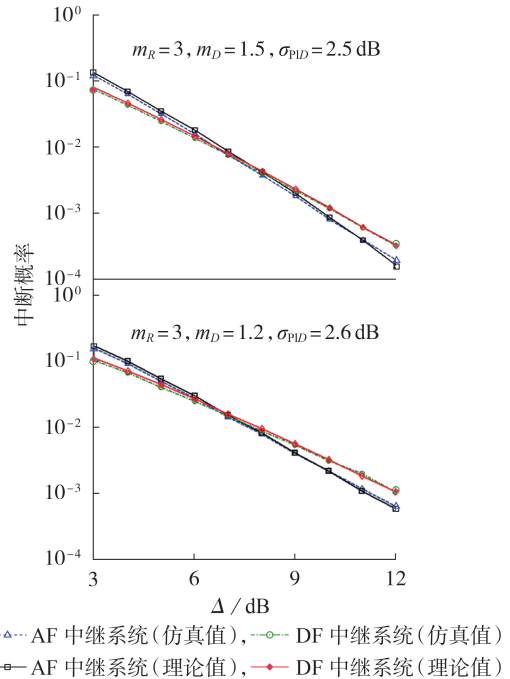


图2 不同信道条件下,AF和DF中继系统的理论和仿真中断概率

Fig.2 Theoretical and simulative outage probability of AF and DF relay system in different channel conditions

信道平均信噪比的单调函数,且存在唯一交点,这是实现自适应中继算法的前提条件。例如在 $m_R=3$ 、 $m_D=1.5$ 、 $\sigma_{PID}=2.5$ dB 的条件下,交点对应的信噪比为 7 dB,即在 $\Delta < 7$ dB 的低信噪比区间内,采用 DF 中继协议所获得的中断概率性能较好;当 $\Delta \geq 7$ dB 时,采用 AF 中继协议所获得的中断概率性能较好。这是因为在低信噪比区域噪声信号功率较大,采用 AF 中继协议容易出现错误,而此时如果采用 DF 中继协议,则将直接解码接收到的源信号,不会放大信道噪声,系统的总体性能更好;在高信噪比区域,由于信号功率相对较强,采用 AF 中继协议获得的系统总信噪比较高,系统性能更好。

在 $m_R=3$ 、 $m_D=1.5$ 、 $\sigma_{PID}=2.5$ dB 的条件下求解以信道平均信噪比为变量的方程得到 Δ_{th} 。固定第 1 跳为无线通信,改变第 2 跳的通信方式以及中继协议,设置 5 种中继通信模式:①基于 DF 中继协议的无线-无线通信(W-W(DF));②基于 DF 中继协议的无线-电力线通信(W-PLC(DF));③基于 DF 中继协议的无线-无线/电力线并行通信(W-W/PLC(DF));④基于 AF 中继协议的无线-无线/电力线并行通信(W-W/PLC(AF));⑤基于自适应中继协议的无线-无线/电力线并行通信(W-W/PLC(AR))。图 3 对比了这 5 种中继通信模式的仿真中断概率曲线。

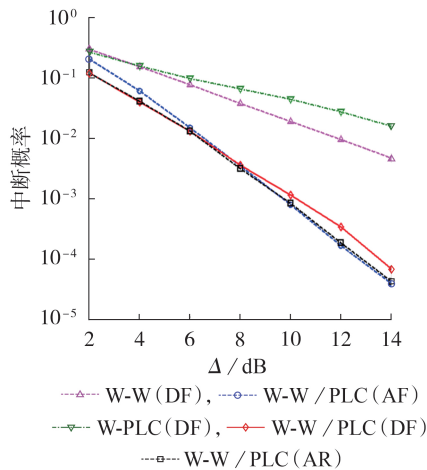


图3 不同中继协议和传输媒质条件下,系统的仿真中断概率对比

Fig.3 Comparison of simulative outage probability under different relay protocols and transmission media

由图 3 可见:采用 DF 中继协议时,无线-无线/电力线并行通信模式的中断概率曲线始终在单媒质通信模式(无线-无线、无线-电力线通信模式)的中断概率曲线下方,说明双媒质并行通信模式获得的分集增益可以有效提高系统的可靠性;在无线-无线/电力线并行通信系统中,对比 AF、DF 和自适应中继协议可知,无论在低信噪比区域还是高信噪比

区域,自适应中继协议都能获得较低的中断概率。这是因为自适应中继算法可以根据信噪比的大小动态选择最佳的中继协议。因此自适应中继协议可以在不增加系统复杂度的前提下,结合 AF、DF 中继协议的优点,使系统的综合性能达到最优。

由前文可知,在不同的信道条件下动态选择 AF 或者 DF 中继协议可以使系统性能达到最优。例如在 $\Delta=6$ dB 和 $\Delta=14$ dB 的情况下,分别选择 DF 中继协议和 AF 中继协议可以获得更好的系统性能。在总功率不变,且并行通信采用等功率分配的条件下,分别令 $\Delta=6$ dB 和 $\Delta=14$ dB,研究功率分配对系统性能的影响。图 4 给出了在不同衰落参数下,中继的系统仿真中断概率与发射功率 P_s 的关系。

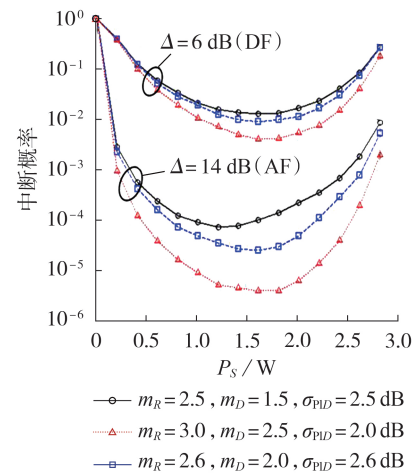


图4 中继系统的中断概率性能与发射功率的关系

Fig.4 Relationship between outage probability of relay system and transmitted power

由图 4 可知:在不同的中继协议和信道衰落参数组合下,随着发射功率的变化,中断概率曲线连续且平滑,变化趋势均为先下降后上升,在功率区间 $(0, 3) W$ 内存在唯一的极值点。因此基于中继转发的双媒质并行通信系统在采用 MRC 方式时,存在最优的功率分配因子使得系统性能达到最佳。例如当 $\Delta=14$ dB 时,自适应中继方案采用 AF 中继协议,若取 $m_R=2.6$ 、 $m_D=2.0$ 和 $\sigma_{PID}=2.6$ dB,则将 P_s 设置为 $1.5 W$ 可使系统的中断概率最小。因此,在实际系统设计时,可以根据信道质量,选择最佳的功率分配因子来优化系统性能。

本文针对图 1 所示的系统模型采用 DF 中继协议的情况,考虑双变量功率分配可以使系统的中断概率最小,对存在约束条件的非线性多元函数进行最优求解,即在总发射功率 P 不变的前提下,同时改变 P_s 、 P_{R1} 和 P_{R2} ,通过最佳功率分配使系统的中断概率最小。本文建立如下数学模型:

$$\begin{cases} \min P_{out}^{DF} \\ \text{s.t. } P_s + P_{R1} + P_{R2} = P \end{cases} \quad (32)$$

该数学模型以最小中断概率为优化目标,结合约束条件求解最佳的功率分配因子,可得到在不同信道衰落条件下的最佳功率分配因子组合供实际应用参考,如表1所示。

表1 不同衰落参数下最低中断概率的最佳功率分配因子

Table 1 Optimal power allocation factor for lowest outage probability under different fading parameters

$\sigma_{PI/D} / \text{dB}$	m_R	m_D	P_S / W	P_{R1} / W	P_{R2} / W	P_{out}^{DF}
2.5	2.5	1.5	1.60	0.70	0.70	1.4×10^{-4}
2.0	2.5	2.0	1.98	0.51	0.51	6.3×10^{-5}
2.0	3.0	2.5	1.94	0.53	0.53	1.1×10^{-5}
3.0	2.0	1.0	1.50	0.75	0.75	9.7×10^{-5}

5 结论

本文针对基于中继协议的双媒质并行通信系统模型,提出了自适应中继算法,根据信道质量动态选择AF或者DF中继协议。利用二维LogN近似算法给出系统输出信噪比的MGF,并推导出采用不同的中继协议时系统中断概率的闭合表达式。最后结合理论计算和蒙特卡洛仿真,分析了中继协议、双媒质混合通信以及功率分配对系统性能的影响规律。结果表明,本文所提自适应中继算法在不增加系统复杂度的前提下,可以获得最佳的通信质量,使整个系统能够在更宽的信噪比区间内获得相对最优的中断概率性能,有效地克服了AF和DF中继协议的缺点,在实际通信系统中具有重要的意义。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] DE DIB L M B A, FERNANDES V, DE FILOMENO L M, et al. Hybrid PLC/wireless communication for smart grids and Internet of Things applications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(2): 655-667.
- [2] 胡正伟, 贺冬梅, 谢志远. 基于FastICA算法的电力线通信OFDM信号分离方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 212-217. HU Zhengwei, HE Dongmei, XIE Zhiyuan. OFDM signal separation method for power line communication based on FastICA algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 212-217.
- [3] CHEN Zhixiong, JING Yifang, HAN Dongsheng. Performance analysis of dual-media cooperative communication based on wireless and power line under hybrid fading[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2019, 15(5): 1-11.
- [4] 刘晓胜, 崔莹, 徐殿国. 低压电力线通信组网性能优化方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 16-21, 42. LIU Xiaosheng, CUI Ying, XU Dianguo. Performance optimization for low voltage power line communication[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 16-21, 42.
- [5] 陈智雄, 韩东升, 邱丽君. 室内无线和电力线双媒质协作通信系统性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2589-2598.

CHEN Zhixiong, HAN Dongsheng, QIU Lijun. Research on the performance of cooperation communication system based on indoor double media with wireless channel and power line [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2589-2598.

- [6] KIM K H, LEE H B, KIM Y H, et al. Cooperative multihop AF relay protocol for medium-voltage power-line-access network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 195-204.
- [7] KIM Y H, CHOI S, KIM S C, et al. Capacity of OFDM two-hop relaying systems for medium-voltage power-line access networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 886-894.
- [8] 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.
- [9] MIAO Qiangqiang, BAI Bo, CHEN Wei. Adaptive AF/DF selection with FD/HD switching in two-way relay networks [J]. IEEE Access, 2017, 5: 11594-11605.
- [10] TUAN N T, KIM D S, LEE J M. On the performance of cooperative transmission schemes in industrial wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(9): 4007-4018.
- [11] LAI S W, MESSIER G G. The wireless/power-line diversity channel[C]//2010 IEEE International Conference on Communications. Cape Town, South Africa: IEEE, 2010: 1-5.
- [12] FERNANDES V, POOR H V, RIBEIRO M V. Analyses of the incomplete low-bit-rate hybrid PLC-wireless single-relay channel [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(2): 917-929.
- [13] 陈智雄, 景一方, 韩东升, 等. 基于矩生成函数近似的双媒质协作通信功率优化分配[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(23): 236-248. CHEN Zhixiong, JING Yifang, HAN Dongsheng, et al. Moment generation function approximation based power optimization allocation in dual media cooperative communication[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(23): 236-248.
- [14] MATHUR A, BHATNAGAR M R, AI Y, et al. Performance analysis of a dual-hop wireless-power line mixed cooperative system[J]. IEEE Access, 2018, 6: 34380-34392.
- [15] CHEN Zhixiong, WANG Lijiao, HAN D S, et al. A unified performance analysis of relaying communication system for IoT application with hybrid fading[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(1): 570-583.
- [16] MEHTA N, WU Jingxian, MOLISCH A, et al. Approximating a sum of random variables with a lognormal[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(7): 2690-2699.

作者简介:



史燕平

史燕平(1978—),女,江苏宜兴人,工程师,研究方向为电力系统通信技术(E-mail: shiyanping@sgepri.sgcc.com.cn);

王丽娇(1992—),女,河北邢台人,硕士研究生,主要研究方向为无线和电力线通信(E-mail: 18831633659@163.com);

陈智雄(1983—),男,福建莆田人,副教授,博士,主要研究方向为协作通信和电力系统通信(E-mail: zxchen@ncepu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Adaptive relay protocol for power line-wireless hybrid media communication system

SHI Yanping^{1,2}, WANG Lijiao³, LI Xiucui¹, LI Lang¹, HUANG Xin^{1,2}, CHEN Zhixiong³

(1. NARI Group Corporation / State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211006, China;

2. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control(NARI Group Corporation), Nanjing 211106, China;

3. Department of Electronic and Communication, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Considering hybrid media communication and relay cooperative technology, the wireless mobile access, wireless and power line parallel transmission systems are studied. By using multidimensional LogN approximation algorithm and MGF(Moment Generating Function) of terminal SNR(Signal to Noise Ratio), the closed analytic expressions of the outage probability when the system adopts AF(Amplify and Forward) and DF(Decode and Forward) are deduced respectively. Then, in order to overcome the shortcomings of AF and DF relay protocols effectively, the adaptive relay protocol is proposed, that is, AF or DF relay protocols are dynamically selected according to the channel communication quality. The specific implementation steps are given. Monte Carlo simulation is used to verify the effectiveness and reliability of theoretical analysis, and the theoretical and simulative results show that, compared with AF and DF relay protocols, the proposed adaptive relay protocol can achieve better communication quality in both low and high SNR regions.

Key words: hybrid media communication; power line communication; wireless communication; diversity and combining; adaptive relay protocol; multi-dimensional LogN approximation algorithm; performance analysis

(上接第170页 continued from page 170)

Fault section location and fault propagation path reasoning of power grid based on LSTM

LI Zhouping¹, YAO Wei¹, ZENG Linggang¹, MA Shicong², WEN Jinyu¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and

Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: To maintain the security and stability of power system after failure, it is necessary to locate the fault section quickly and determine the propagation path of the fault impact, a fault section location and fault propagation path reasoning method based on LSTM(Long Short-Term Memory network) is proposed. Firstly, two fault diagnosis models are built by LSTM to realize online fault time judgment and fault section location respectively. Then, the propagation path of the impact caused by the fault can be determined by the ESP(Energy Supply on Port) of the transmission lines near the fault. Finally, the 8-machine 36-bus power grid is taken as an example for verification, and the results show that the proposed model can detect the fault immediately after it occurs, give fault section and fault impact propagation path, and has strong robustness to noise.

Key words: electric power systems; online fault diagnosis; deep neural network; long short-term memory network; sliding window; energy supply on port

附录

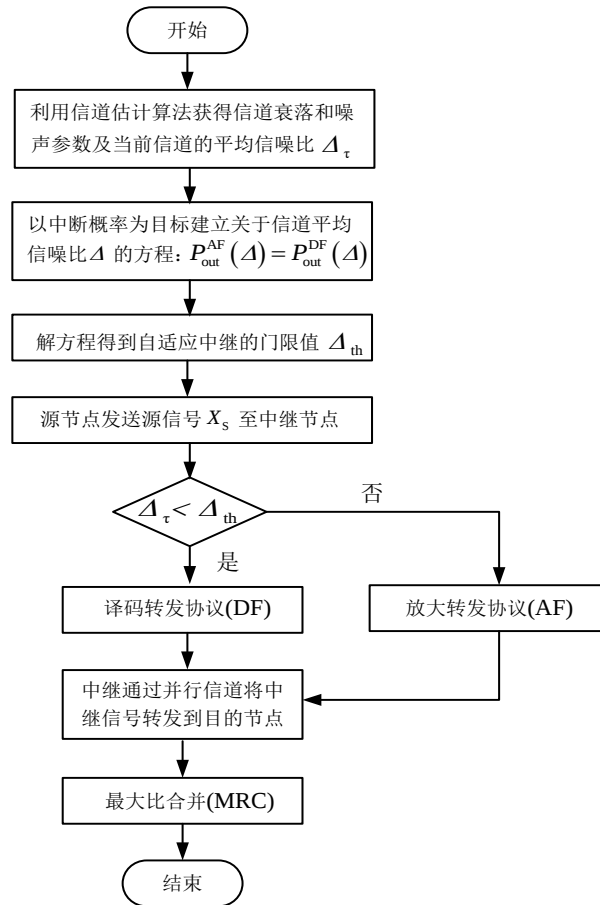


图 A1 自适应中继协议的实现流程

Fig.A1 Implementation flowchart of adaptive relay protocol