

基于能量有效性和时间有效性的联合优化绿色通信算法

吴鹏悦^{1,2}, 季薇^{1,2*}

(1. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 南京 210003; 2. 宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室(南京邮电大学), 南京 210003)

(*通信作者电子邮箱 jiwei@njupt.edu.cn)

摘要:针对传统协作功率分配方案中忽略信道估计误差和电路能量消耗的问题,提出了一种改进的绿色联合优化算法。该算法在保证用户服务质量要求的前提下,引入信道估计误差、中继节点的电路能耗,联合能量有效性和时间有效性进行中继节点选择和各个节点功率分配,并利用拉格朗日方法得到了源节点和中继节点发送功率的闭式解。仿真结果表明,相对于传统的功率分配算法,高信噪比时改进算法的能量有效性提高了30%左右,而低信噪比时性能接近传统算法。

关键词:绿色通信;协作通信;多目标优化;能量有效性;时间有效性

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A

Energy efficiency and time efficiency based joint optimization scheme for green communication

WU Pengyue^{1,2}, JI Wei^{1,2*}

(1. College of Telecommunication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu 210003, China;

2. Key Laboratory of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology

(Nanjing University of Posts and Telecommunications), Ministry of Education, Nanjing Jiangsu 210003, China)

Abstract: Traditional power allocation schemes have ignored channel estimation errors and circuit energy consumption. To solve this problem, an improved green joint optimization scheme was proposed in this paper. On the premise of guaranteeing user's QoS (Quality of Service), energy efficiency and time efficiency for relay selection and each relay's power allocation were jointly optimized in the improved scheme, with taking channel estimation errors and relay circuit energy consumption into consideration. In the end, the closed solutions of transmit power of the source node and relay nodes were obtained. The simulation results show that the proposed scheme performs 30% better than traditional optimization scheme in energy efficiency with high SNR (Signal-to-Noise Ratio) and has a close performance with low SNR.

Key words: green communication; cooperative communication; multi-objective optimization; energy efficiency; time efficiency

0 引言

在日益增长的无线宽带服务需求的带动下,未来的无线网络将面临不同的数据速率需求和服务质量要求(Quality of Service, QoS)^[1]。无线通信网络的规模将更加庞大、结构将更加复杂,这势必带来更多的能源消耗和二氧化碳排放,加剧能源危机,增加了环境保护难度。针对这个问题,绿色创新、节能减排已经成为了ICT(Information and Communication Technology)领域内所有机构和企业的共识^[2]。“绿色通信”引起了通信领域的极大关注,成为一个新兴的研究热点。然而,现有的一些节能方案,往往以牺牲QoS来换取系统功耗的降低,显然,这种方案并不可取。

在多用户环境中,协作通信技术使无线网络中邻近的节点相互协作发送,产生一个虚拟多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)结构,获得分集增益和较强的抗干扰能力,同时实现节点间的资源(天线、频谱、功率等)的充分共享^[3]。无线通信系统中引入协作是实现绿色通信的关键技术之一,能在对现有的无线网络架构改变最小的前提下,提高

能量有效性,减少传输,降低辐射^[4]。目前,国内外已有大量文献研究绿色无线通信技术,这些文献从不同的角度分析并提出了相关方案。文献[5]提出基于空间复用的协作资源分配方案,自适应地调整源节点的发送功率,控制参与转发的中继节点的数量,从而实现系统能耗的降低;但是为了降低反馈开销,该方案采取中继节点一旦被选中,马上进行最大功率转发的策略,这对于许多无线网络来说(例如无线传感网以及移动台作为中继节点的网络)网络的生命周期大大降低,因而并不适用。在构建绿色网络时,考虑到一些网络(如移动网络、Ad Hoc网络等),中继节点的电池容量是有限的,应尽量减小发送功率,或者引入休眠机制。文献[6]将睡眠模式和协作通信结合,中继节点队列中没有待发送数据包时,进入睡眠模式,只接收源节点的数据包,发送天线关闭。在一个随机时长后或者有发送请求时开启,进行数据包转发。文献[7]提出了一种编码无线传感器网络中联合协作通信和多播的最小功耗算法,该算法使用跨层优化框架,每个节点有恒定的发射电路功率。该框架采用不需要信道状态信息的简单协作通信方案,并结合线性优化模型。在随机的拓扑网络中节

收稿日期:2014-01-13;修回日期:2014-02-24。

基金项目:江苏省“信息与通信工程”优势学科建设工程项目(YX002001);南京邮电大学科研基金资助项目(NY212040)。

作者简介:吴鹏悦(1986-),男,江苏泰兴人,硕士研究生,主要研究方向:协作通信、绿色通信;季薇(1979-),女,江苏淮安人,副教授,主要研究方向:通信信号处理、协作通信、认知无线通信。

约近40%能量消耗;但是完全忽略信道状态信息,导致系统的中断概率增加,造成发射功率的浪费。文献[8]考虑在没有直传链路的三点模型中,利用不完备的信道状态信息进行能量感知分配的协作通信系统。在有信道估计误差的情况下,分别以发送功率最小化和信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)最大化为目标进行优化。文献[9]提出了在协作蜂窝网络中多目标联合优化的算法,在不完善的信道状态信息(Channel State Information, CSI)条件下,忽略直传链路,以系统发送功率最小化、信噪比最大化进行多目标优化。通过调整两个子目标的权重因子,提升系统的能效。但是该方案只有一个中继节点,没有进行中继节点选择。

本文研究准静态瑞利衰落信道下的源节点、多个中继节点功率联合分配方案。融合系统的总功率和时间有效性为多目标优化函数,基于该函数建模。利用经典的基于KKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件的Lagrange算法求解,得到了源节点功率和中继节点功率的闭合表达式。

1 系统模型

如图1,考虑由一个源节点、一个目的节点以及 N 个备选中继节点所构成的协作通信系统,任意两个节点间的信道增益均服从准静态平坦瑞利分布。源节点—目的节点、源节点—中继节点、中继节点—目的节点之间的信道系数分别表示为 h_{sd} 、 h_{sr} 、 h_{rd} ,它们均值为0,方差分别为 $\sigma_{\delta_{sd}}^2$ 、 $\sigma_{\delta_{sr}}^2$ 、 $\sigma_{\delta_{rd}}^2$ [4]。 h_{ij} 表示节点 i 和节点 j 间的信道增益, $h_{ij} = (d_0/d_{ij})^\alpha$,其中 α 为路径损失系数, d_0 是参考距离, d_{ij} 是节点 i 与节点 j 之间的距离。

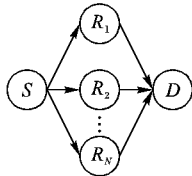


图1 系统模型

假设各信道的信道系数在每帧的传输过程中保持不变,并且帧与帧之间信道系数的变化相互独立。目的节点可获取系统中所有信道的瞬时信道信息,并可通过低速率反馈信道告知信源和中继节点相应的信息,反馈所需要的能量很小,可以忽略不计。

协议分为两个阶段。第一阶段,源节点广播发送数据包,中继节点中能够正确接收数据的节点记为集合 $D(s)$,直传链路信道较差,不能解码。第二阶段,中继节点转发数据包,部分中继节点尽管属于集合 $D(s)$,并不会参与转发,而被选中的中继节点采取分布式空时编码的方式进行转发。假设信源以功率 P_s 广播信息,而被选中的中继节点以功率 P_r 转发信息。信号经过信道受到路径损耗、衰落和加性高斯白噪声的影响。考虑路径损耗模型,接收到的信号功率和路径损耗指数 α 有关,并随传播距离增加而减小[10]。本文主要考虑最坏情况的小区边缘用户,假设基站和这些边缘用户之间的直传链路处于深度衰落状态,并且任意两个节点之间的信道都服从平坦瑞利衰落。使用基于最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)的信道估计方法来估计源-中继节点以及中继节点-目的节点之间的信道增益,分别用 \hat{h}_{sr} 和 \hat{h}_{rd} 来表示。由

于使用了MMSE估计方法,则会存在信道估计误差,即:

$$h_{sr} = \hat{h}_{sr} + \delta_{sr} \quad (1)$$

$$h_{rd} = \hat{h}_{rd} + \delta_{rd} \quad (2)$$

其中: \hat{h}_{sr} 和 \hat{h}_{rd} 分别是信道估计值, δ_{sr} 和 δ_{rd} 分别是估计误差。在MMSE估计方法中,估计误差和信道估计值是不相关的。假设估计误差 δ_{sr} 和 δ_{rd} 服从均值为0,方差分别为 $\sigma_{\delta_{sr}}^2$ 和 $\sigma_{\delta_{rd}}^2$ 的加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)。

考虑一个半双工系统的下行传输,目的节点不能收到源节点的信号,完整的传输在两个时隙内完成。在第一个时隙,源节点将信号传送给中继节点;在第二个时隙,选择合适的中继节点,将信号放大并转发给目的节点。源节点和中继节点发送信号的功率归一化系数可以表示为:

$$\beta = \sqrt{\frac{P_r}{P_s \left(|\hat{h}_{sr_i}|^2 + \sigma_{\delta_{sr_i}}^2 \right) + \sigma_{n_{r_i}}^2}} \quad (3)$$

假设选中 $M(i = 1, 2, \dots, M)$ 个中继节点,因此,第一时隙第 i 个中继节点接收到的信号以及第二个时隙目的端接收到的信号分别为:

$$y_{sr_i} = \sqrt{P_s} h_{sr_i} s + n_{r_i} \quad (4)$$

$$y_{rd} = \beta \left(\sqrt{P_s} h_{sr_i} s + n_{r_i} \right) h_{rd} + n_d \quad (5)$$

式中: P_s 是源节点的传输功率, s 是源节点传输的信号, n_{r_i} 和 n_d 分别是中继节点 i 和目的节点处的接收噪声。假设 n_{r_i} 和 n_d 为零均值循环对称复高斯随机向量(Zero-Mean Circularly Symmetric Complex Gaussian random variable, ZMCSCG),方差分别为 $\sigma_{n_{r_i}}^2$ 和 $\sigma_{n_d}^2$ [9]。

第一跳链路,源节点—中继节点形成了单输入多输出(Single Input Multiple Output, SIMO)系统,信道($N_s = 1$, $N_R \geq 2$)由矢量 $\mathbf{h}_1 = [h_{11}, h_{21}, \dots, h_{N_R 1}]^T$ 表示,这种情况下,信道矩阵的秩为1,特征值由下式给出:

$$\|\mathbf{h}_1\|_F^2 = \sum_{i=1}^{N_R} |h_{i1}|^2 \quad (6)$$

第二跳链路,中继节点—目的节点形成了MISO系统,信道($N_R \geq 2$, $N_D = 1$)由矢量 $\mathbf{h}_2 = [h_{11}, h_{12}, \dots, h_{1N_R}]^T$ 表示,这种情况下,信道矩阵的秩也为1,特征值由下式给出:

$$\|\mathbf{h}_2\|_F^2 = \sum_{j=1}^{N_R} |h_{1j}|^2 \quad (7)$$

根据式(3)和式(4),将估计误差作为附加噪声,可以得到接收端的信噪比 γ :

$$\gamma = \frac{\theta_1 \theta_2 P_s P_r}{(\theta_1 + \theta_2 + 1) P_s P_r + (\theta_1 + 1) \theta_4 P_s + (\theta_2 + 1) \theta_3 P_r + \theta_3 \theta_4} \quad (8)$$

其中: $\theta_1 = \frac{\|\mathbf{h}_1\|_F^2}{\sigma_{\delta_{sr}}^2}$, $\theta_2 = \frac{\|\mathbf{h}_2\|_F^2}{\sigma_{\delta_{rd}}^2}$, $\theta_3 = \frac{\sigma_{n_r}^2}{\sigma_{\delta_{sr}}^2}$, $\theta_4 = \frac{\sigma_{n_d}^2}{\sigma_{\delta_{rd}}^2}$ 。

在瑞利衰落的场景下,吞吐量的表达式为:

$$C(\gamma) = \frac{1}{\lg 2} e^{1/\gamma} \int_{1/\gamma}^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt \quad (9)$$

对于吞吐量性能分析,将式(7)给出的系统容量作为可实现的系统吞吐量。此外,本文将能量有效性定义为单位传输功率获得的吞吐量,并将能量有效性作为一个主要的性能

指标来评价该方案的节能性能。假设每个中继节点维持发送的电路功率和冷却能耗之和相同,值为 P_{cir} 。因此,协作通信系统的能量有效性的计算公式为:

$$\eta_e = \frac{C(\gamma)}{P_s + NP_r + (N+1)P_{\text{cir}}} \quad (10)$$

假设系统使用无差错反馈信道。在本文的模型中,源节点和中继节点的最大允许传输功率由用户的最高功率预算 P_{max} 来限制,即 $P_s + NP_r + (N+1)P_{\text{cir}} \leq P_{\text{max}}$ 。

2 绿色优化算法

2.1 能量有效性最大化优化算法(方案一)

本节提出一个基于代价函数的功率分配算法。在满足用户的最小信噪比 γ_{\min} 要求的情况下,选择最优的中继节点组合和发送功率来最小化代价函数。 ω_1, ω_2 是非负加权因子,分别是对源节点和中继节点的发送功率的加权,并且 $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 。

将 N 个中继节点按照链路增益从大到小排序,从 $M = 1$ 开始计算。最小化总功率的目标函数可以表示为:

$$f^*(P_s, P_r) = P_s + NP_r + (N+1)P_{\text{cir}} \quad (11)$$

$$\underset{P_s, P_r}{\text{minimize}} \text{Cost}(N) = \omega_1 P_s + \omega_2 (NP_r + (N+1)P_{\text{cir}}) \quad (12)$$

$$\text{s. t. } P_s + NP_r + (N+1)P_{\text{cir}} \leq P_{\text{max}} \quad (13)$$

$$1/\gamma \leq 1/\gamma_{\min} \quad (14)$$

$$P_s \geq 0 \quad (15)$$

$$P_r \geq 0 \quad (16)$$

在实际场景下,通过调整权重值,能够获得更高的能效。由于 $\text{Cost}(N)$ 也是 (P_s, P_r) 上的凸函数。符合 KKT 条件,引入非负拉格朗日乘子,得到:

$$L = \omega_1 P_s + \omega_2 (NP_r + (N+1)P_{\text{cir}}) + \lambda_1 (P_s + NP_r + (N+1)P_{\text{cir}} - P_{\text{max}}) + \lambda_2 (1/\gamma - 1/\gamma_{\min}) - \lambda_3 P_s - \lambda_4 P_r \quad (17)$$

$$\lambda_1^* (P_s^* + NP_r^* + (N+1)P_{\text{cir}} - P_{\text{max}}) = 0 \quad (18)$$

$$\lambda_2^* (1/\gamma^* - 1/\gamma_{\min}) = 0 \quad (19)$$

$$\begin{cases} \lambda_3^* P_s^* = 0 \\ \lambda_4^* P_r^* = 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$P_s^* + NP_r^* + (N+1)P_{\text{cir}} \leq P_{\text{max}} \quad (21)$$

$$1/\gamma^* \leq 1/\gamma_{\min} \quad (22)$$

$$\begin{cases} P_s^* \geq 0 \\ P_r^* \geq 0 \end{cases} \quad (23)$$

$$\lambda_i^* \geq 0, i = 1, 2, \dots, 4 \quad (24)$$

$$\frac{dL}{dP_s^*} = \omega_1 + \lambda_1 - \lambda_2 \frac{\theta_3 (P_r + \theta_4 + P_r \theta_2)}{P_r P_r^2 \theta_1 \theta_2} - \lambda_3 = 0 \quad (25)$$

$$\frac{dL}{dP_r^*} = N\lambda_1 + N\omega_2 - \lambda_2 \frac{\theta_4 (P_s + \theta_3 + P_s \theta_1)}{P_s P_r^2 \theta_1 \theta_2} - \lambda_4 = 0 \quad (26)$$

其中 $(\cdot)^*$ 代表对应的变量值是最优解,式(18)~(20)是松弛互补条件,式(21)~(24)是可行性条件,式(25)~(26)是稳定性条件。因为 P_s^*, P_r^* 非负,由式(20)可知 $\lambda_3^* = \lambda_4^* = 0$ 。因为 $\lambda_1^* \geq 0$,由式(26)~(27)推出 $\lambda_2^* > 0$ 。根据式(20)可知 $\gamma^* = \gamma_{\min}$ 。联合式(8)可以得到 P_s, P_r 的最优解:

$$P_s^* = \left\{ \left[\theta_1 \theta_2 \theta_3 \theta_4 N (\lambda_1 + \omega_2) (1 + \gamma_{\min}) \gamma_{\min} / (\lambda_1 + \omega_1) \right]^{1/2} + \theta_3 (1 + \theta_2) \gamma_{\min} \right\} \times \left[\theta_1 \theta_2 - (1 + \theta_1 + \theta_2) \gamma_{\min} \right]^{-1} \quad (27)$$

$$P_r^* = \left\{ \left[\theta_1 \theta_2 \theta_3 \theta_4 (\lambda_1 + \omega_1) (1 + \gamma_{\min}) \gamma_{\min} / N (\lambda_1 + \omega_2) \right]^{1/2} + \theta_4 (1 + \theta_1) \gamma_{\min} \right\} \times \left[\theta_1 \theta_2 - (1 + \theta_1 + \theta_2) \gamma_{\min} \right]^{-1} \quad (28)$$

根据式(18),假设 $P_s^* + NP_r^* + (N+1)P_{\text{cir}} < P_{\text{max}}$,得到 $\lambda_1^* = 0$ 。对于给定的权重因子 ω_1, ω_2 可以直接由式(27)、(28)得到实际的最优发送功率 P_s^*, P_r^* 。如果解出的 $P_s^* + NP_r^* + (N+1)P_{\text{cir}} > P_{\text{max}}$,则说明 $\lambda_1^* \neq 0$ 。由(18)可知 $P_s^* + NP_r^* + (N+1)P_{\text{cir}} = P_{\text{max}}$,继而将式(28)、(29)代入 $P_s^* + NP_r^* + (N+1)P_{\text{cir}} = P_{\text{max}}$,可得 λ_1^* 如式(29)所示。如果 λ_1^* 为正实数,说明最优解存在,再将 λ_1^* 代入式(27)、(28)求出实际最优发送功率 P_s^*, P_r^* ; 否则不存在最优解。具体流程如下,由该流程可以得到最佳中继节点个数 M , 源节点和中继节点的发送功率。

$$\lambda_1 = \left[\omega_1 N (2N + 2 - t^2) + \omega_2 (2N + 2 - Nt^2) \pm (\omega_1 - \omega_2) Nt \sqrt{(t^2 - 4)} \right] \times (N^2 + 2N + 1 - Nt^2)^{-1} \quad (29)$$

其中

$$t = \left[(P_{\text{max}} - NP_{\text{cir}}) (\theta_1 \theta_2 - (1 + \theta_1 + \theta_2) \gamma_{\min}) - (\theta_4 (1 + \theta_1) + \theta_3 (1 + \theta_2)) \gamma_{\min} \right] \times \left[\sqrt{\theta_1 \theta_2 \theta_3 \theta_4 (1 + \gamma_{\min}) \gamma_{\min}} \right]^{-1} \quad (30)$$

方案一 算法流程:

已知量: $\omega_1, \omega_2, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \gamma_{\min}, M = 1$

- 1) 假设 $\lambda_1^* = 0$
- 2) 根据式(28)和式(29)计算得到 P_s^*, P_r^*
- 3) if $(P_s^* + NP_r^* + (N+1)P_{\text{cir}} < P_{\text{max}})$
- 4) P_s^*, P_r^* 即为所求最优解。
- 5) else if $(P_s^* + NP_r^* + (N+1)P_{\text{cir}} > P_{\text{max}})$
- 6) 说明 $\lambda_1^* \neq 0$
- 7) 根据式(19)得到: $P_s^* + NP_r^* + (N+1)P_{\text{cir}} = P_{\text{max}}$
- 8) 把 $P_s^* + NP_r^* + (N+1)P_{\text{cir}} = P_{\text{max}}$ 代入式(28)和(29),可求解得到 λ_1^*
- 9) if (求解所得 $\lambda_1^* \geq 0$)
- 10) 把 λ_1^* 的值代入式(28)和(29),可求得最优解 P_s^*, P_r^*
- 11) else
- 12) 最优解不存在,令 $P_s^* = 0, P_r^* = 0$, 传输中断
- 13) end if
- 14) 计算 $\text{Cost}(M)$
- 15) 令 $M = M + 1$, 重复步骤1)~14)计算 $\text{Cost}(M+1)$
- 16) if $\text{Cost}(M+1) < \text{Cost}(M)$ 重复步骤15)
- 17) else 得到 M, P_s^*, P_r^*

2.2 能量有效性和时间有效性的联合优化算法(方案二)

本节提出一个基于能量有效性和时间有效性的联合优化算法。在满足用户的最小信噪比 γ_{\min} 要求的情况下,在发送功率、时间有效性这两个矛盾的目标之间权衡。使用多目标优化的概念,根据它们的相对重要性加权,最后形成目标函数。

将 N 个中继节点按照链路增益从大到小排序,从 $M = 1$ 开始计算。最小化总功率的目标函数可以表示为: $f^*(P_s, P_r) = P_s + NP_r + (N+1)P_{\text{cir}}$,接着设定最小化时间的目标函数,假设在带宽为 B 的信道上发送 D 位的数据,所需时间为 $t = D/[C(\gamma)B]$;将 D/B 归一化,得到 $t = 1/C(\gamma)$ 。 $C(\gamma)$ 是 γ

的单调递减函数,最小化 $C(\gamma)$ 等同于最小化 $1/\gamma$ 。 ω_1 、 ω_2 是非负加权因子,表示两个目标对最终目标函数的权重,并且 $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 。对于给定的中继个数 N ,有代价函数 $Cost(N)$:

$$\underset{P_s+P_r}{\text{minimize}} \quad Cost(N) = \omega_1(P_s + NP_r + (N+1)P_{\text{cir}}) + \omega_2(1/\gamma) \quad (31)$$

$$\text{s. t.} \quad P_s + NP_r + (N+1)P_{\text{cir}} \leq P_{\text{max}} \quad (32)$$

$$1/\gamma \leq 1/\gamma_{\text{min}} \quad (33)$$

$$P_s \geq 0 \quad (34)$$

$$P_r \geq 0 \quad (35)$$

与方案一相同的计算方法可得 P_s 、 P_r 最优解:

$$P_s^* = \frac{\sqrt{\theta_1\theta_2\theta_3\theta_4N(1+\gamma_{\text{min}})\gamma_{\text{min}} + \theta_3(1+\theta_2)\gamma_{\text{min}}}}{\theta_1\theta_2 - (1+\theta_1+\theta_2)\gamma_{\text{min}}} \quad (36)$$

$$P_r^* = \frac{\sqrt{\theta_1\theta_2\theta_3\theta_4(1+\gamma_{\text{min}})\gamma_{\text{min}}/N + \theta_4(1+\theta_1)\gamma_{\text{min}}}}{\theta_1\theta_2 - (1+\theta_1+\theta_2)\gamma_{\text{min}}} \quad (37)$$

最优解与权重因子 ω_1 、 ω_2 及拉格朗日乘子并不相关,同样可以通过迭代的方式选出最佳中继节点个数 M ,从而得到源节点和中继节点的最优解。从式(36)、(37)可以看出方案二的解是方案一取 $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$ 的特例。

3 仿真结果与性能分析

本章对所提联合优化绿色通信算法的性能进行分析。采用进行蒙特卡洛仿真,仿真次数为 5000 次。仿真中设置源节点与中继节点的距离 100 m。整个系统的预算功率 40 W, $\sigma_{\delta_{sr}}^2 = \sigma_{\delta_{rd}}^2 = 0.01$, 路径损耗指数 $\alpha = 3$ 。假设系统采用正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 技术,中继节点之间相互不形成干扰,且中继节点发送功率相同。

图 2 是权重因子 $\omega_1 = 0.5$ 时,不同中继节点数量条件下,能量有效性最大化优化算法(方案一)代价函数曲线图。由图中曲线可知,对于大多数信噪比要求,费用函数是先减后增的趋势。增加合适数量的中继节点能够减少费用函数。但是由于中继节点电路消耗 P_{cir} 的存在,中继节点数量增加到一定值后,再继续增加,能量消耗的增速大于协作带来的增益的增加,降低系统的能量有效性。

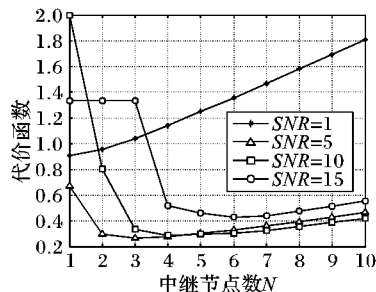


图2 $Cost(N)$ 与中继节点数量 N 的关系

图 3 是相同中继节点数目条件 ($N = 5$), 不同权重因子下能量有效性最大化优化算法(方案一)能量有效性曲线图。当 $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$ 时,该算法的能量有效性最高,这根曲线同时也是能量有效性和时间有效性的联合优化算法(方案二)的能量有效性曲线。由仿真结果可知,联合能量有效性和时间有效性的算法复杂度明显低于单独考虑能量有效性,这时能量有效性达到最佳,是更加绿色的方案。但是方案二的各

个节点的发送功率不能随着权重因子变化而调节。当无线网络中某些节点电量有限时,应采取方案一,降低电量低节点的权重因子,减小该节点发送功率。通过牺牲一部分能量有效性,延长整个系统的生命周期。

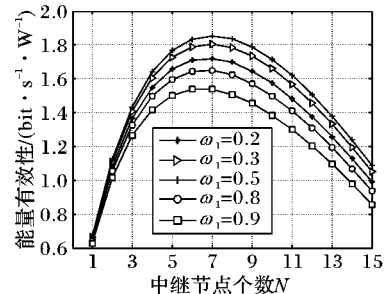


图3 不同 ω_1 时系统的能量有效性

最后与传统的优化算法^[9]进行比较,如图 4 和图 5 所示。在低信噪比需求的很低条件下,传统的算法性能较好。但是在信噪比要求较高时,联合优化绿色通信算法代价函数只有传统的 25% ~ 45%, 拥有更高的能量有效性。

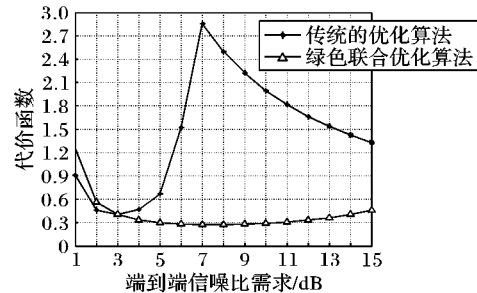


图4 不同算法的代价函数曲线

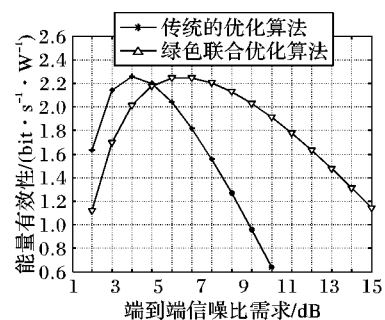


图5 不同算法的能量有效性曲线

4 结语

本文提出一种基于协作通信的联合能量有效性、时间有效性多目标优化算法。在系统最大能耗限制的条件下,结合时间有效性和 QoS 需求,动态地分配源节点和中继节点的发送功率,最终得到了闭合表达式。为了使系统模型具有更高的实用性和鲁棒性,考虑 CSI 的估计误差以及中继节点的电路消耗。仿真结果表明,相比传统的不考虑时间影响因子的功率分配,并与单个中继节点的联合优化算法进行比较,本算法提高了系统的能量有效性等性能。本文算法还有改进之处,如果中继节点较多并且信道质量相近条件下,选择中继节点的迭代次数过多,算法复杂度增加。接下来的工作将会就此问题进行进一步研究。

参考文献:

- [1] LUAH A J, CHEE KEONG T. A Nash-based power control game for green communications via cognitive radio networks[C]// Proceed-

- ings of the 2012 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology. Piscataway: IEEE, 2012: 164 – 169.
- [2] ZHANG H. Green communication is firstly needed for ICT development[R/OL]. [2013-05-19]. <http://www.ccidcom.com/html/chanpinjishu/fuwuyunwei/tongxinjien/2013/05/20-199887.htm> (张海龙. ICT 发展——绿色为先[R/OL]. [2013-05-19]. <http://www.ccidcom.com/html/chanpinjishu/fuwuyunwei/tongxinjien/2013/05/20-199887.htm>).
- [3] NOSRATINIA A, HUNTER T E, HEDAYAT A. Cooperative communication in wireless networks[J]. IEEE Communication Magazine, 2004, 42(10): 74 – 80.
- [4] ZHENG K, PENG Y, LONG H, *et al.* Cooperative communication and its application in LTE-Advance[M]. Beijing: Posts & Telecommunications Press, 2010. (郑侃, 彭岳星, 龙航, 等. 协作通信及其在 LTE-Advance 中的应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.)
- [5] LI J, ZHANG Y, SHENG M, *et al.* “Green” resource allocation strategy for effective use of collaborative spatial multiplexing[J]. Journal of University of Science and Technology China, 2009, 39(10): 1022 – 1026. (李建东, 张琰, 盛敏, 等. 有效利用协同空间复用的“绿色”资源分配策略[J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(10): 1022 – 1026.)
- [6] DEMOOR T, ANDREEV S, de TURCK K, *et al.* On the effect of combining cooperative communication with sleep mode[C]// Proceedings of the 9th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services. Piscataway: IEEE, 2012: 59 – 62.
- [7] SHI L Q, EGBOGAH E, FAPOJUWO A. Combined cooperative communication and multicast for minimum power cost in coded wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 2011 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE, 2011: 755 – 760.
- [8] DEVARAJAN R, PUNCHIHEWA A, BHARGAVA V K. Energy-aware power allocation in cooperative communication systems with imperfect CSI[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(5): 1633 – 1639.
- [9] DEVARAJAN R, JHA S C, PHUYAL U, *et al.* Energy-aware resource allocation for cooperative cellular network using multi-objective optimization approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(5): 1797 – 1807.
- [10] GOLDSMITH A. Wireless Communications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [11] MEDARD M. The effect upon channel capacity in wireless communications of perfect and imperfect knowledge of the channel[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(3): 933 – 946.
- [12] GAO F F, CUI T, NALLANATHAN A. On channel estimation and optimal training design for amplify and forward relay networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(5): 1907 – 1916.
- [13] SEYFI M, MUHAIDAT S, LIANG J. Outage probability of selection cooperation with channel estimation errors[C]// Proceedings of the 71st IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE, 2010: 1 – 5.
- [14] GAO W, WANG W, YUAN G, *et al.* Joint optimization of relay selection and power allocation in cooperative communication[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008, 31(2): 68 – 71. (高伟东, 王文博, 袁广翔, 等. 协作通信中的中继节点选取和功率分配联合优化[J]. 北京邮电大学学报, 2008, 31(2): 68 – 71.)
- [15] FARHADI G, BEAULIEU N. On the ergodic capacity of multi-hop wireless relaying systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(5): 2286 – 2291.
- [16] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [17] LI J, BOSE A, ZHAO Y. Rayleigh flat fading channels’ capacity [C]// Proceedings of the 3rd Annual Communication Networks and Services Research Conference. Piscataway: IEEE, 2005: 214 – 217.

(上接第 1968 页)

- [6] ZHANG M, WU C, WANG B, *et al.* Research on mapping method of logical carrying network across multiple domains[J]. Journal on Communications, 2012, 33(8): 200 – 207. (张旻, 吴春明, 王滨, 等. 跨域逻辑承载网映射方法研究[J]. 通信学报, 2012, 33(8): 200 – 207.)
- [7] YU H, ANAND V, QIAO C, *et al.* Enhancing virtual infrastructure to survive facility node failures [C]// Proceedings of the 2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition. Piscataway: IEEE, 2011: 1 – 3.
- [8] GUO T, WANG N, MOESSNER K, *et al.* Shared backup network provision for virtual network embedding[C]// Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE, 2011: 1 – 5.
- [9] QI N, WANG B, WANG Z. Research on reconfigurable service carrying network active protection algorithms [J]. Journal on Communications, 2012, 33(8): 171 – 179. (齐宁, 汪斌强, 王志明. 可重构服务承载网主动保护算法研究[J]. 通信学报, 2012, 33(8): 171 – 179.)
- [10] WANG Z, WANG B, WANG B. Virtual network reliable mapping scheme based on topology impact degree and backtracking migration[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2012, 34(12): 2898 – 2904. (王志明, 汪斌强, 王保进. 基于拓扑影响度和回溯迁移的虚拟网可靠性映射方案[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(12): 2898 – 2904.)
- [11] QI N, WANG B, WANG Z. Research on reconfigurable service carrying network resilient construction algorithms [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2012, 34(2): 468 – 473. (齐宁, 汪斌强, 王志明. 可重构服务承载网容错构建算法研究[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 468 – 473.)
- [12] MIAO Y, WU C, YANG Q, *et al.* Self-healing mechanism for reconfigurable service overlay networks [J]. Journal on Communications, 2012, 33(8): 52 – 61. (缪宇霆, 吴春明, 杨强, 等. 可重构服务承载网愈合机理研究[J]. 通信学报, 2012, 33(8): 52 – 61.)
- [13] IANNACCONE G, CHUAH C, MORTIER R, *et al.* Analysis of link failures in an IP backbone [C]// Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Internet Measurement. New York: ACM, 2002: 237 – 242.
- [14] MARKOPOULOU A, IANNACCONE G, BHATTACHARYYA S, *et al.* Characterization of failures in an IP backbone [C]// Proceedings of the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Piscataway: IEEE, 2004, 4: 2307 – 2317.