

基于能量均衡的认知无线电 双向中继网络能耗优化研究

赵 澄¹, 吴科丽², 姚信威¹, 王万良¹

(1. 浙江工业大学计算机科学与技术学院, 浙江杭州 312400; 2. 浙江工业大学信息工程学院, 浙江杭州 312400)

摘 要: 针对使用电池的认知无线电(CR)节点能量消耗不均衡导致系统节点生存时间短, 能量利用率低的问题, 提出了一种基于双向中继(TWR)的无线通信能耗均衡通信系统. 该系统由源节点、目的节点、双向中继及其接收节点组成, 每个节点分配初始能量, 节点间通过合理的方法设置发射功率来实现功率归一化处理, 从而平衡节点间的能量, 防止网络中部分节点由于能量耗尽过早消亡, 实现无线通信网络中节点能量的均衡和网络生存寿命的最大化. 仿真结果表明, 本文提出的基于能量归一化均衡算法可最大化能效, 并能提高能量利用率的同时延长系统生存时间.

关键词: 双向中继; 能量归一化; 能量均衡; 能量效率.

中图分类号: TN925+.1

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2018)01-0230-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.01.032

Energy Consumption Optimization of Cognitive Radio Relay Network Based on Energy Normalization

ZHAO Cheng¹, WU Ke-li², YAO Xin-wei¹, WANG Wan-liang¹

(1. College of Computer Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang, 312400, China;

2. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang, 312400, China)

Abstract: In view of the problem that the node energy consumption is not balanced and system survival time unbalanced, put forward a kind of energy consumption balancing communication system based on two-way relay (TWR) in Cognitive radio networks (CRN). The system consists of source node and destination node, two-way relay (TWR) and receiving nodes, each node distribute initial energy, through setting up reasonable transmitted power to achieve power normalization processing, balance the node energy, in order to prevent the part of the node perish due to run out of energy, to realize Cognitive radio network (CRN) node energy equilibrium and maximize survival of life. Simulation results show that the proposed based on the normalized energy equalization algorithm can maximize efficiency, extend the system survival time while improve the utilization ratio of energy.

Key words: two-way relay; energy normalization; energy equilibrium; energy efficiency.

1 引言

随着手机、无线通信和无线传感网络等移动无线设备^[1,2]的快速兴起,人们对无线通信系统数据传输质量和效率的要求日益严格,然而一些制约其发展的瓶颈问题也随之产生,其中最重要的是频谱资源的利用和网络节点能量受限. 无线频谱是一种稀缺的固有资源,如何有效的利用频谱资源变得越来越重要,现有的大部分频谱资源已经被占用,且存在利用率不高的问题. 为了解决无线通信需求不断增加和频谱资源利用

率低下下的问题,认知无线电(Cognitive Radio, CR)^[2,3]的概念被提出来,其核心思想是在不影响主用户(Primary User, PU)正常使用的前提下,次级用户(Secondary User, SU)可以自由选择空闲频段进行无线通信,灵活的利用空闲的频谱资源,有效的提高频谱资源利用率.

然而,单个次级用户的无线网络频谱利用率低,影响通信系统数据的传输. 网络编码(Network Coding, NC)^[4]为认知无线电频谱的合理利用提供了技术上的支持,通过网络编码技术实现的双向中继(Two-Way Relay, TWR)不仅实现了空间分集增益,提高信道利用率的同时还节

收稿日期:2016-08-11; 修回日期:2017-01-18; 责任编辑:郭游

基金项目:浙江省自然科学基金(No. LQ14F020005); 国家自然科学基金(No. 61379123, No. 61402414); 国家科技十二五支撑计划(No. 2012BAD10B01); 浙江省教育厅资助项目(No. Y201431815)

省信息传递时隙数,进一步节省了网络资源,在合理利用信道带宽提高频谱效率的同时还可以增加网络安全性.国内外许多学者致力于双向中继和网络编码的研究,取得了一定的理论成果.文献[5]在双向中继网络中对带宽和功率的分配方式进行了联合优化,使得主用户在满足功率约束和 QoS 的同时,提高系统吞吐量.文献[6]提出编码感知路由思想,通过在路由建立阶段构造特定的编码结构,主动创造编码机会,提高频谱利用率.文献[7]基于双向中继能量资源分配提出了功率和子信道最优分配策略.文献[8]研究了中继辅助的潜伏式认知无线电双向通信,以最大化双向通信均可达到的端到端速率为目标,给出了其最优功率和时隙分配方法.

与此同时,高频谱效率技术的广泛应用,以及高数据速率带来的高速增长的能量消耗,制约了无线通信技术的深入发展.降低通信成本,提高移动终端电池的使用寿命,合理均衡节点能量消耗,提高认知无线电系统能量效率(Energy Efficiency, EE)成为了急需解决的问题.随之各种节约能效的优化算法层出不穷.文献[9]基于随机线性编码提出了功率可调的低能耗机会路由,结合节点剩余能量和链路上收发双方的总能耗为转发代价,降低节点能耗,延长网络生存时间.文献[10]研究了非完美功率放大器情况下,双向解码转发中继的能耗效率模型和最优算法.文献[11]研究了一种均衡能量效率和频谱效率的折衷双向中继系统的放大转发策略.文献[12]研究了能量效率最大化的认知多用户双向中继网络的功率优化问题.文献[13]提出了基于网络编码的优化策略,通过减少转发次数,降低能量消耗,延长了系统的网络生存时间.文献[14]在考虑放大转发中继功率的基础上,提出了最佳能量效率的功率分配算法.

本文在合理利用能量的基础上,针对认知中继网络中存在的能量消耗不均衡问题,结合双向中继和网络编码技术,对传统能效进行了改进,提出了“绝对能效”的概念.本文引入节点当前能量作为新变量,利用无线网络中的归一化功率代替传统功率,对发射功率和频谱进行联合优化,来尽力均衡各节点的能量消耗.本文提出的方法可以应用到许多典型的信息交互无线网络中,如 ZigBee, WiFi, 无线 Mesh 网络和移动终端等,该方法能够合理利用节点能量,提高能量利用率,延长系统的生存时间,一定程度上改善了无线网络能耗问题,具有广泛的应用前景.

2 系统模型

本文考虑的系统包含一个主用户对 S 和 D 以及一个次级用户对 R 及其接收节点 R_1 ,且每个节点都有自己的电池用于信息传输所需能量,系统模型如图 1 所示,中继 R 采用半双工解码转发(Decode-and-Forward,

DF)模式,并遵循双向中继协议.

通信过程可以分为 2 个阶段:第一阶段是能量检测阶段,检测各节点电池的剩余能量;第二阶段是数据传输阶段,系统各节点间进行数据传输.

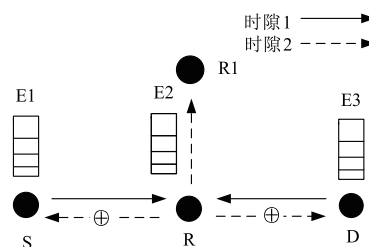


图1 系统模型

各节点均在时隙模式工作,一个完整的传输时间片可以分为两个时隙.本文假设时隙内信道状态保持不变,并且每个传输时隙等长.第一时隙中,主用户 S 和 D 通过频分复用的方式以一定的带宽将各自的信息 m_s 和 m_d 通过编码调制为发送信号 S_s 和 S_d ,并同时以功率 P_1 和 P_3 向中继节点 R 发送.假设噪声是加性高斯白噪声,则主用户对 $S \rightarrow R$ 和 $D \rightarrow R$ 的信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)分别表示为

$$SNR_1 = \frac{|h_{SR}|^2 P_1}{\alpha B N_0} \quad (1)$$

$$SNR_2 = \frac{|h_{DR}|^2 P_3}{\beta B N_0} \quad (2)$$

其中, N_0 是加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)的功率密度, B 是带宽, h_{SR} 和 h_{DR} 分别表示 $S \rightarrow R$, $D \rightarrow R$ 的信道增益系数, α, β 分别是节点 S, D 到中继 R 的传输信道带宽占用比, $\alpha + \beta = 1$.

由香农定理可得主用户对 S 和 D 的数据传输速率分别为

$$Rate_{S \rightarrow R} = \frac{1}{2} \alpha B \log_2(1 + SNR_1) \quad (3)$$

$$Rate_{D \rightarrow R} = \frac{1}{2} \beta B \log_2(1 + SNR_2) \quad (4)$$

第二时隙中,中继使用网络编码,将解码信息 m_s 和 m_d 按位异或运算,再进行编码成为信号 m_{s+d} ,调制为发送信号 m_r ,最后,中继 R 以一定的带宽 γ 和发射功率 P_4 广播信息给主用户对,主用户 S 和 D 对各自接受信号进行解调、解码,并与自己已有信息进行异或运算后解码出对方发来的信号.同时,中继 R 再利用剩下的带宽 $(1 - \gamma)$ 以功率 P_5 来传输自己的信息给 R_1 ,则中继 R 的总发射功率为 P_2 , $P_2 = P_4 + P_5$.

系统中继广播 $R \rightarrow S, D$ 和次级用户 $R \rightarrow R_1$ 的信噪比分别为

$$SNR_3 = \min\left(\frac{|h_{SR}|^2 P_4}{\gamma B N_0}, \frac{|h_{DR}|^2 P_4}{\gamma B N_0}\right) \quad (5)$$

$$SNR_4 = \frac{|h_{RR_1}|^2 P_5}{(1-\gamma)BN_0} \quad (6)$$

其中, h_{RR_1} 表示 $R \rightarrow R_1$ 的信道增益.

由香农定理可得中继 R 广播的速率和次级用户数据传输速率分别为

$$Rate_{R \rightarrow S, D} = \frac{1}{2} \gamma B \log_2(1 + SNR_3) \quad (7)$$

$$Rate_{R \rightarrow R_1} = \frac{1}{2} (1 - \gamma) B \log_2(1 + SNR_4) \quad (8)$$

而因为

$$Rate_{S \rightarrow D} = \min(Rate_{S \rightarrow R}, Rate_{R \rightarrow S, D}) \quad (9)$$

$$Rate_{D \rightarrow S} = \min(Rate_{D \rightarrow R}, Rate_{R \rightarrow S, D}) \quad (10)$$

为了使主用户数据能正常传输, 要保证

$$Rate_{S \rightarrow R}, Rate_{D \rightarrow R}, Rate_{R \rightarrow S, D} \geq Rate_T \quad (11)$$

其中, $Rate_T$ 是主用户正常传输的速率阈值.

传统的能量效率指的是单位能量下, 系统所传输的数据量. 但是在实际的无线网络中, 由于各个节点电池的初始能量情况不同, 可能出现由于某个节点能量不足而减少系统生存时间的状况. 为了更科学的对能效进行优化, 本文的优化目标是在确定的电池容量下, 系统传输的数据总量, 也称之为“绝对能效” U , 其单位同样是 bit/J.

$$U = \frac{C}{\sum_{i=1}^3 E_i} = \frac{\sum_{t=1}^T (Rate_{S \rightarrow D} + Rate_{D \rightarrow S} + Rate_{R \rightarrow R_1}) ts}{\sum_{i=1}^3 E_i} \quad (12)$$

其中, E_1, E_2, E_3 分别为系统节点 S, D, R 的当前剩余能量, C 为系统传输总数据量, ts 为每个时间片长度, T 为系统生存时间内总时间片个数. 故本文的目标是根据节点当前能量状态, 通过分配功率, 均衡能量消耗从而最大化系统的绝对能效, 即

$$\begin{aligned} & (P_1^*, P_3^*, P_4^*, P_5^*, \alpha^*, \beta^*, \gamma^*) \\ & = \operatorname{argmax} U(P_1, P_3, P_4, P_5, \alpha, \beta, \gamma) \\ & \text{s. t. } \begin{cases} 0 < \alpha < 1, 0 < \beta < 1, 0 < \gamma < 1 \\ \alpha + \beta = 1 \\ P_1 \leq P_S \\ P_3 \leq P_D \\ P_2 = P_4 + P_5 \leq P_R \\ Rate_{S \rightarrow R}, Rate_{D \rightarrow R}, Rate_{R \rightarrow S, D} \geq Rate_T \end{cases} \quad (13) \end{aligned}$$

其中, P_S 是主用户 S 正常传输的最大发射功率阈值, P_D 是主用户 D 正常传输的最大发射功率阈值, P_R 是中继 R 正常传输的最大发射功率阈值.

3 基于能量均衡的资源优化

基于第 2 节所提出的问题, 最优化绝对能效 U 属于

NP 难题. 本文提出了基于能量均衡的优化算法——归一化功率优化算法: 通过利用电池当前电量作为分母, 将发射功率进行归一化处理, 即把目标函数(12)用如下函数代替:

$$\begin{aligned} & (P_1^*, P_3^*, P_4^*, P_5^*, \alpha^*, \beta^*, \gamma^*) \\ & = \operatorname{argmax} \frac{\sum_{i=1}^T (Rate_{S \rightarrow D} + Rate_{D \rightarrow S} + Rate_{R \rightarrow R_1})}{\sum_{i=1}^3 \frac{P_i}{E_i}} \quad (14) \end{aligned}$$

由于(14)在每个传输时间片内的传输过程都是相互独立的, 所以目标函数可以进一步简化成:

$$U' = \frac{Rate_{S \rightarrow D} + Rate_{D \rightarrow S} + Rate_{R \rightarrow R_1}}{\sum_{i=1}^3 \frac{P_i}{E_i}} \quad (15)$$

通过对功率进行归一化处理, 当其中一个节点的电池电量不足可能成为系统瓶颈时, 减少其消耗, 通过增加其他节点能量消耗作为代偿, 从而达到调节目.

由于(15)仍然不容易直接求解, 且在一个时间片中两个时隙的传输过程相互独立, 所以可以分别对两个时隙进行优化. 在第一时隙中 P_4, P_5, E_2 对系统性能无影响, 则时隙一的优化目标可转化为

$$U_1 = \left(\frac{Rate_{S \rightarrow R} + Rate_{D \rightarrow R}}{\frac{P_1}{E_1} + \frac{P_3}{E_3}} \right) \quad (16)$$

则时隙一的最优功率分配可表示为

$$\begin{aligned} & (P_1^*, P_3^*, \alpha^*, \beta^*) = \operatorname{argmin} U_1 \\ & = \operatorname{argmin} \left(\frac{Rate_{S \rightarrow R} + Rate_{D \rightarrow R}}{\frac{P_1}{E_1} + \frac{P_3}{E_3}} \right) \end{aligned}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} Rate_{S \rightarrow R} = \alpha B \log_2 \left(1 + \frac{|h_{SR}|^2 P_1}{\alpha B N_0} \right) \geq Rate_T \\ Rate_{D \rightarrow R} = \beta B \log_2 \left(1 + \frac{|h_{DR}|^2 P_3}{\beta B N_0} \right) \geq Rate_T \\ \alpha + \beta = 1 \\ P_1 \leq P_S \\ P_3 \leq P_D \end{cases} \quad (17)$$

上述优化问题可以通过拉格朗日乘数法进行求解, 求解过程如下:

第一步: 通过反证法可以求得, 当 U 达到最大值时, $Rate_{S \rightarrow R}, Rate_{D \rightarrow R}, Rate_{R \rightarrow S, D}$ 三者值相等. 又因为要保证主用户的传输带宽, 所以 $Rate_{S \rightarrow R} = Rate_T$, 则式(17)的约束可以变为;

$$\begin{cases} Rate_{S \rightarrow R} = \alpha B \log_2 \left(1 + \frac{|h_{SR}|^2 P_1}{\alpha B N_0} \right) = Rate_T \\ Rate_{D \rightarrow R} = \beta B \log_2 \left(1 + \frac{|h_{DR}|^2 P_3}{\beta B N_0} \right) = Rate_T \\ \alpha + \beta = 1 \end{cases} \quad (18)$$

第二步:分别把 P_1, P_3, β 用 α 表示,则优化目标可以化为只含 α 的函数;

$$\beta = 1 - \alpha \quad (19)$$

$$P_1 = \frac{\alpha \left(\exp\left(\frac{\text{Rate}_T \log(2)}{\alpha}\right) - 1 \right)}{|h_{SR}|^2} \quad (20)$$

$$P_3 = - \frac{\left(\frac{1}{\exp\left(\frac{\text{Rate}_T \log(2)}{\alpha - 1}\right)} - 1 \right) (\alpha - 1)}{|h_{DR}|^2} \quad (21)$$

则此时目标函数可化为

$$U_1(\alpha) = \frac{\alpha \left(\exp\left(\frac{\text{Rate}_T \log(2)}{\alpha}\right) - 1 \right)}{|h_{SR}|^2 E_1} - \frac{\left(\frac{1}{\exp\left(\frac{\text{Rate}_T \log(2)}{\alpha - 1}\right)} - 1 \right) (\alpha - 1)}{|h_{DR}|^2 E_3} \quad (22)$$

第三步:在 α 的取值区间内对目标函数求最小值;

$$\frac{dU_1}{d\alpha} = - \frac{\alpha \left(\exp\left(\frac{\text{Rate}_T \log(2)}{\alpha}\right) - 1 \right)}{E_1 |h_{SR}|^4} \quad (23)$$

$$U_1' = \frac{d^2 U_1}{d\alpha^2} = - \frac{2\alpha \left(\exp\left(\frac{\text{Rate}_T \log(2)}{\alpha}\right) - 1 \right)}{E_1 |h_{SR}|^6} \quad (24)$$

因为 $\alpha \in (0, 1)$, 所以 $\frac{\text{Rate}_T \log(2)}{\alpha} > 0$. 由指数函数性质可得 $\exp\left(\frac{\text{Rate}_T \log(2)}{\alpha}\right) > 1$, 因此 $\exp\left(\frac{\text{Rate}_T \log(2)}{\alpha}\right) - 1 > 0$. 将其代入式(24), 可以得出目标函数的二阶导数 $\frac{d^2 U_1}{d\alpha^2} < 0$, 说明上述目标函数是凸函数, 可根据拉格朗日乘数法求得 α 的最优值, 继而求得 P_1^*, P_3^* 和 β^* .

将求得的 P_1^*, P_3^* 带入目标函数由式(15)可得新的目标函数为 U_2 , 且

$$U_2 = \frac{(1 - \gamma) \text{Blog}_2 \left(1 + \frac{|h_{RR_i}|^2 P_5}{(1 - \gamma) BN_0} \right) + \text{Rate}_{R \rightarrow S, D}}{\frac{P_1^*}{E_1} + \frac{P_3^*}{E_3} + \frac{P_4 + P_5}{E_2}} \quad (25)$$

则时隙二中的最优功率和带宽分配可表示为

$$(P_4^*, P_5^*, \gamma^*) = \arg \max U_2 = \arg \max \frac{(1 - \gamma) \text{Blog}_2 \left(1 + \frac{|h_{RR_i}|^2 P_5}{(1 - \gamma) BN_0} \right) + \text{Rate}_{R \rightarrow S, D}}{\frac{P_1^*}{E_1} + \frac{P_3^*}{E_3} + \frac{P_4 + P_5}{E_2}}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \text{Rate}_{R \rightarrow S, D} = \gamma \text{Blog}_2 \left(1 + \frac{|h_t|^2 P_4}{\gamma BN_0} \right) \geq \text{Rate}_T \\ P_2 = P_4 + P_5 \leq P_R \\ \text{Rate}_{R \rightarrow S, D} \geq \text{Rate}_T \\ h_t = \min(h_{SR}, h_{DR}) \end{cases} \quad (26)$$

上述优化问题可以通过拉格朗日对偶法求解, 式(26)的拉格朗日对偶函数 $\omega(\theta)$ 为

$$\omega(\theta) = \max L(P_4, P_5, \gamma) \quad (27)$$

其拉格朗日函数 $L(P_4, P_5, \gamma)$ 表示为

$$L(P_4, P_5, \gamma) = \frac{(1 - \gamma) \text{Blog}_2 \left(1 + \frac{|h_{RR_i}|^2 P_5}{(1 - \gamma) BN_0} \right) + \text{Rate}_{R \rightarrow S, D}}{\frac{P_1^*}{E_1} + \frac{P_3^*}{E_3} + \frac{P_4 + P_5}{E_2}} + \theta_1 \left(\gamma \text{Blog}_2 \left(1 + \frac{|h_t|^2 P_4}{\gamma BN_0} \right) - \text{Rate}_T \right) + \theta_2 (P_R - P_4 - P_5) + \theta_3 (\text{Rate}_{R \rightarrow S, D} - \text{Rate}_T)$$

其中, $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 表示满足速率和功率要求的对偶变量. 因此对偶问题可以表示为

$$\min \omega(\theta) \quad \theta > 0 \quad (29)$$

根据文献[15]可知, 上述对偶函数是个凸问题, 所以我们可以利用次梯度算法求解对偶变量. $\omega(\theta)$ 的次梯度可以表示为

$$\Delta \theta_1 = \gamma \text{Blog}_2 \left(1 + \frac{|h_t|^2 P_4}{\gamma BN_0} \right) - \text{Rate}_T \quad (30)$$

$$\Delta \theta_2 = P_R - P_4 - P_5 \quad (31)$$

$$\Delta \theta_3 = \text{Rate}_{R \rightarrow S, D} - \text{Rate}_T \quad (32)$$

4 数值结果与仿真

为了验证本文提出的资源节约和能量均衡优化方案, 仿真主要分析节点能量和生存时间对能效的影响. 由于本文的目标不同于系统吞吐量最优化或者是传统的能量效率最优化算法, 而是在确定电池初始值的情况下对系统传输数据总量进行最优化, 所以本文选取了前两者中比较有代表性的优化算法进行对比. 方案1是本文提出的归一化功率能效优化算法; 方案2^[5]是对双向中继传输中的认知用户吞吐量进行优化; 方案3^[10]是在未考虑电池初始电量的情况 E_3 下, 对系统的能量效率进行优化. 本文使用 MATLAB 进行数值仿真实验, 系统模型在理想状态下建立, 能效模型的参数如下表, 其中 d_1, d_2, d_3 分别为主用户到中继 R , 中继 R 到主用户 D , 中继 R 到其接收用户 R_1 的距离.

首先研究本文提出的算法对电池能量消耗的影响. 图2将中继节点 R 的电池初始电量 E_2 设定为远小于另外两个节点的电量, 使之成为整个系统的瓶颈(选取另外两个

电池 E_1 和 E_3 作为瓶颈也有类似的结果). 从图2中可以看出, 由于 E_2 初始电量不高, 而且需要同时发送主用户数据和次级用户数据, 能量消耗更快. 当 E_2 消耗完后, 系统生存时间即结束. 方案2 由于注重追求速率而缺乏对能量效率的优化, 导致 E_2 被迅速消耗, 系统生存时间也最短. 方案3 经过能效优化后, 大大提高了系统生存时间. 本文提出的方案1 相比方案3, 加入了对电量平均消耗的控制, 可以看到电量最为充足的 E_1 , 消耗增加, 而电量相对较少的 E_3 , 消耗却减少了. 对于瓶颈 E_2 , 在电量充足的情况下, 消耗和方案3 类似, 但当电量减少到一定程度, 调节机制开始发挥作用, 减少了 E_2 的消耗, 最终进一步提高了系统生存时间.

表1 主要参数仿真设置

参数	设定值	参数	设定值
d_1	0.95	P_S	2000
d_2	1.05	P_R	4000
d_3	1.15	P_D	2000
E_1	10000	E_3	10000
E_2	7000		

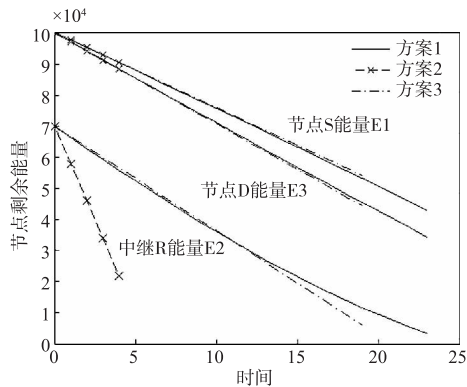


图2 节点剩余能量随时间的比较

当然, 系统生存时间的提高并不是没有代价的, 由于主用户的传输必须优先保证, 次级用户的传输速率必然会受到限制. 图3 给出了三种方案下次级用户吞吐量在系统生存时间内的变化图. 方案2 和3 由于不能根据电量对发射功率进行调整, 所以在整个系统生存时间内传输速率保持不变. 其中方案2 以次级用户吞吐量作为主要优化目标, 所以速度最快, 但是作为妥协, 系统的生存时间大大减少. 方案3 降低了速度来保证消耗的减少, 从而提高了系统生存时间. 本文提出的方案1 在保证主用户传输速率的情况下, 次级用户速率随时间的增加和电池剩余量的减少, 慢慢降低, 但是直到系统生存时间结束其最慢速率比起初始情况, 只降低了13.6%, 仍然具有很强的实用性. 而且方案1 更大程度的保证了主用户的传输时间, 更加符合认知无线电定义.

图4 给出了三种方案中继节点 R 初始能量 E_2 和系统总传输数据量的变化曲线(选取 E_1 或者 E_3 作为横坐标也有类似的结果). 由于木桶效应, 随着初始能量的不断增

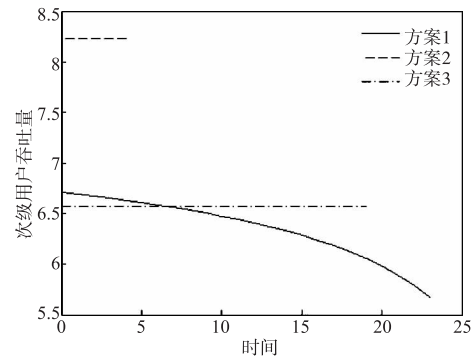


图3 系统吞吐量随传输时间的比较

加, 总的传输数据量会在达到极限之后不再增加. 但是由于对能量需求量的不同, 这个极限的大小和到来的顺序也不同. 方案3 由于经过能效优化, 对能量的需求量较小, 在初始能量较低的情况下就能获得比较好的效果, 而其数据传输的极限来的最早, 但是也由于这个原因, 当初始能量过大时, 反而优化效果不如其余两种算法. 方案2 注重传输速率的最大化, 所以对能量需求量最大, 在初始能量较低的时候效果较差, 而随着能量增加, 数据传输量达到极限会最终超过方案3. 本文提出的方案1 从始至终保持着最高的数据传输量, 而且由于其能对能量的消耗进行更均匀的分配, 不仅能在初始能量较小的情况下提供不错的结果, 极限也来的更晚, 更能够适应不同的电池状况.

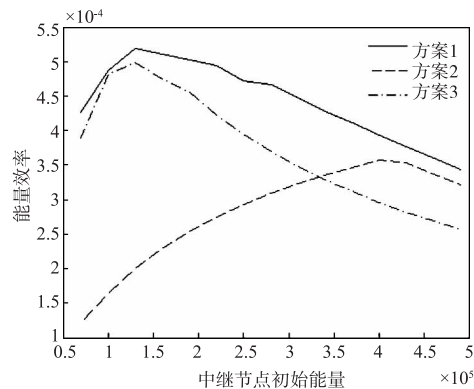


图4 能量效率随中继节点初始能量的比较

同时, 为了更好的了解本文优化方案的性能优势, 本文还对系统能量利用率做了实验. 能量利用率^[12] 的定义就是消耗能量与总能量的比值. 图5 给出了节点初始能量与系统能量利用率的关系变化曲线图, 图中3 条曲线的趋势大致相同, 均是先不断的上升, 到达峰值后开始下降. 其中方案3 对于电量需求量较小, 很早达到峰值并迅速下降, 方案2 较晚才达到峰值. 但是可以看出由于缺乏对电池消耗的平衡调整能力, 方案2 和3 能维持峰值的区间很小, 大部分的时候, 能量利用率并不高. 本文提出的方案1 由于能够根据电池电量对消耗进行调节, 具有较强的适应性, 可以在非常大的区间内都保持高利用率(大于0.9) 和对方案2,3 的优势.

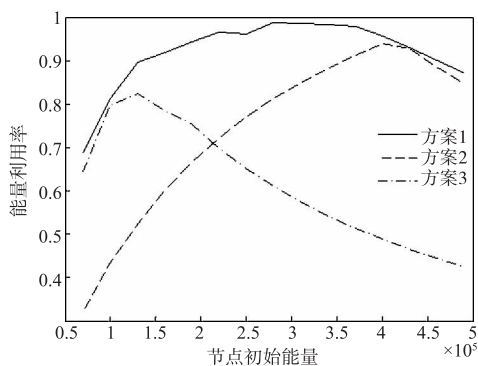


图5 能量利用率随节点初始能量的比较

5 结论

本文针对认知无线电中能量短缺的问题,提出了一种基于均衡能量的系统能效优化算法. 该方案引入了节点电池的当前电量作为新的变量,在保证主用户传输的基础上合理的规划节点剩余能量,均衡各节点的能量消耗,并对不同优化方案进行了数值仿真实验. 仿真结果表明本文所提出的优化方案不仅提高了系统能量效率,增加了系统能量利用率,还一定程度上延长了系统生存时间.

虽然本文提出的方案在系统性能方面有了一定的优化,可是能量再次利用率不是很高,下一步将在利用已有能量的基础上,捕获周围环境中游离的能量形成完整的能量资源利用方案.

参考文献

- [1] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey[J]. Computer networks, 2008, 52(12): 2292 – 2330.
- [2] Badoi C-I, Prasad N, Croitoru V, et al. 5G based on cognitive radio [J]. Wireless Personal Communications, 2011, 57(3): 441 – 464.
- [3] Haykin S. Cognitive radio: brainempowered wireless communications[J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2005, 23(2): 201 – 220.
- [4] Katti S, Rahul H, Hu W, et al. XORs in the air: practical wireless network coding [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN), 2008, 16(3): 497 – 510.
- [5] Alsharoa A, Ghazzai H, Yaacoub E, et al. Bandwidth and power allocation for two-way relaying in overlay cognitive radio systems [A]. 2014 IEEE Global Communications Conference [C]. Austin: IEEE, 2014. 911 – 916.
- [6] 陈晨, 董超, 茅娅菲, 等. 无线网络编码感知路由综述 [J]. 软件学报, 2015, 26(1): 82 – 97.
- [7] Xiong C, Lu L, Li G. Energy-efficient O-FDMA-based two-way relay [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(9): 3157 – 3169.

- [8] 陆路希, 蒋伟, 项海格, 等. 适应低信干噪比的认知无线电双向中继方案及其最优功率和时隙分配 [J]. 电子学报, 2012, 40(1): 35 – 39.

LU Lu-xi, JIANG Wei, XIANG Hai-ge, et al. A cognitive two-way relay scheme for low-SINR environments and its optimal power allocation and time division [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(1): 35 – 39. (in Chinese)

- [9] 徐骥, 朱艺华, 田贤忠, 等. 无线传感器网络中利用随机网络编码的低能耗可靠机会路由 [J]. 电子学报, 2016, 44(8): 1799 – 1805.

XU Ji, ZHU Yi-hua, TIAN Xian-zhong, et al. Energy-efficient reliable opportunistic routing applying random network coding for wireless sensor network [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(8): 1799 – 1805. (in Chinese)

- [10] Cui Q, Yuan T, Tao X, et al. Energy efficiency analysis of two-way DF relay system with non-ideal power amplifiers [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(7): 1254 – 1257.

- [11] Zhang C, Ge J, Li J, et al. Energy efficiency and spectral efficiency tradeoff for asymmetric two-way AF relaying with statistical CSI [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(4): 2833 – 2839.

- [12] Li Q, Liu F, Zhou X, et al. Energy efficiency for underlay cognitive multiuser two-way relay networks [J]. Wireless Personal Communications, 2016, 86(3): 1541 – 1555.

- [13] 田贤忠, 阳胜. 基于网络编码的无线传感器网络瓶颈区域生存时间优化策略 [J]. 计算机学报, 2016, 39(5): 1039 – 1050.

- [14] Li Y, Zheng Z, Zhao M, et al. Energy efficient design for two-way AF relay networks [J]. International Journal of Antennas & Propagation, 2014, 2014(4): 1 – 6.

- [15] Boyd S, Vandenberghe L. Convex Optimization [M]. England: Cambridge University Press, 2004.

作者简介



赵 澄 男, 1985 年 4 月出生于合肥, 博士学位. 主要研究方向为无线通讯, 认知无线电, 传感器网络等. 主持并参与了包括浙江省自然科学基金, 国家自然科学基金在内的多个科研项目, 并取得了一定成果, 在国内外杂志发表论文十余篇.

E-mail: zhaoc@zjut.edu.cn



吴科丽 女, 1991 年 12 月 2 生于浙江嵊州, 2010 年在沈阳化工大学获得工学学士学位, 现在在读硕士研究生, 研究方向为认知无线电.

E-mail: 2111403103@zjut.edu.cn