

## 基于 HARQ 协议的多跳中继网络能量效率的跨层优化设计

肖博<sup>\*①</sup> 习勇<sup>①</sup> 韩君妹<sup>①</sup> 葛松虎<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

<sup>②</sup>(海军工程大学舰船综合电力技术国防科技重点实验室 武汉 430033)

**摘要:** 该文针对瑞利衰落信道中采用 Chase 合并混合自动重传请求(CC-HARQ)协议的多跳中继网络提出一种基于跨层设计的能量效率优化策略。为实现能量效率的最大化,基于对数域线性阈值的平均误帧率模型,推导出多跳 CC-HARQ 系统能量效率的闭合表达式,进而设计了最优发送帧长策略和最优发送功率分配方案,其次,针对发送帧长和发送功率分析了两者的联合优化方案。仿真结果验证了理论分析的正确性和可行性,仿真对比实验表明所提跨层优化设计方案可以有效提升实际多跳网络的能量效率性能。

**关键词:** 跨层设计; Chase 合并混合自动重传请求; 多跳中继; 能量效率

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)01-0009-07

DOI: 10.11999/JEIT160264

## Cross-layer Optimization Design of Energy Efficiency in HARQ Based Multihop Relay Networks

XIAO Bo<sup>①</sup> XI Yong<sup>①</sup> HAN Junmei<sup>①</sup> GE Songhu<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

<sup>②</sup>(National Key Laboratory for Vessel Integrated Power System Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The cross-layer optimum scheme of Energy Efficiency (EE) for a multihop relay network with Chase-Combining based Hybrid Automatic Repeat reQuest (CC-HARQ) in Rayleigh fading channels is proposed. In order to maximize EE, a closed-form expression of Energy Efficiency in a multihop CC-HARQ system is derived, which is obtained via an average frame error rate model adopting a new log-domain linear threshold method, and then optimal frame length scheme and optimal transmission power allocation method are further designed, towards the frame length and transmission power, a joint optimization metric of those two parameters is considered. Simulation results verify the correctness and feasibility of the analytical solutions, meanwhile, simulation experiments of comparisons show that the proposed cross-layer optimization design is able to improve the EE performance of practical multihop networks.

**Key words:** Cross-layer design; Chase-Combining based Hybrid Automatic Repeat reQuest (CC-HARQ); Multihop relay; Energy Efficiency (EE)

### 1 引言

随着无线通信技术的发展,用户对无线通信系统可靠性和有效性的需求日益增加。HARQ 协议能够有效提升衰落信道下无线传输的可靠性,在 3GPP LTE 和 IEEE 802.16 等标准中得到广泛应用。其中, Chase 合并混合自动重传请求协议(Chase-Combining based Hybrid Automatic Repeat

reQuest, CC-HARQ)每次重传相同的数据帧,并在接收端将之前接收到的所有数据帧进行最大比合并后进行译码,从而有效提高了译码的准确性。由于具有较高的传输效率和较低的实现复杂度,CC-HARQ 协议成为了 WiMAX 和 3GPP LTE 中不可或缺的关键技术之一。

另一方面,多跳中继技术可以有效提高网络的覆盖范围和数据传输效率,高能效的多跳中继网络更是下一代通信网络的发展趋势。多跳中继网络中采用 HARQ 协议可以提高传输的可靠性,同时优化多跳无线网络的能量效率性能可以减少系统能耗、延长通信终端的续航能力,最大化多跳通信系统的

收稿日期: 2016-03-21; 改回日期: 2016-08-01; 网络出版: 2016-09-30

\*通信作者: 肖博 13272415212@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61471376)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61471376)

能量效率正成为一个日益重要的课题。

在当前的研究工作中,为提高无线通信系统的能量效率,许多学者主要集中在信息论角度<sup>[1-10]</sup>设计了大量优化方案,基于信息论的中断概率, Kim 等人在文献[1-3]中对多跳 HARQ 网络的优化做了大量研究工作,但其主要是针对系统吞吐量的优化。文献[4,10]也基于信息论分析和优化了 HARQ 协议在多跳系统中的能量效率,但此时调制编码方式、发送帧长等实际系统参数在 HARQ 协议中难以体现。同时,文献[1-10]都是针对物理层或者链路层的单层参数进行优化实现能量有效性,没有考虑跨层的参数优化问题,影响了进一步提高 HARQ 协议的效率。文献[11-15]研究了跨层优化时能量效率的最大化问题,区别于信息论的观点,文献[11,12]通过存储拟合大量参数来近似平均误帧率性能,该方法无法对实际系统的帧长进行优化设计。文献[13,14]提出了基于线性阈值的平均误帧率估计模型。文献[15]利用该模型进一步实现了优化发送帧长和发送功率情形下的能量效率和频谱效率的折中方案,但其都是针对单跳的情形,对于多跳中继网络中的 CC-HARQ 协议,其发送帧长和发送功率的跨层优化设计和联合优化策略还没有相关的研究。本文从系统调制编码方式、发送帧长等具体参数出发,利用高斯信道下误帧率曲线陡峭特性<sup>[16]</sup>的思想,给出了一种多跳 CC-HARQ 协议的平均误帧率的闭合表达式,对于实际系统能量效率的跨层优化设计更具参考价值。

针对能量效率的优化设计问题,本文首先给出了衰落信道下多跳 CC-HARQ 系统的平均误帧率表达式,其次,对于发送帧长的优化提出了最优发送帧长策略,对于发送功率的优化提出了最优发送功率分配方案,针对联合优化的情形,设计了跨层的联合优化方案,提出了一种低复杂度的求解最优帧长和发送功率的交替迭代算法,最后通过仿真验证了所设计的优化策略相比于传统的固定帧长的等发送功率策略在提升系统能量效率性能方面的优越性。

## 2 系统模型

如图 1 所示,假设有一个  $M$  跳的中继网络,其包含  $M+1$  个节点,其中  $S$  为源节点,  $D$  为目的节点,  $R_1, R_2, \dots, R_{M-1}$  为  $M-1$  个中继节点,这里考虑的是一个线性网络。同时,假设当信号从源节点经中继节点向目的节点传输时,其它节点对于相邻两节点的信号传输的影响可以忽略。

本文在该  $M$  跳中继网络中采用 CC-HARQ 协议,假设该协议是非截断的,即传输过程中没有最

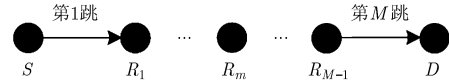


图 1 多跳中继网络模型

大重传次数限制,在传输过程中信息以数据帧的形式从源节点传输到目的节点,每个数据帧包含  $L$  个信息比特和  $L_0$  个控制比特,  $L_0$  个控制比特中包含控制开销等信息,对于信息传递开销的考虑可以通过灵活地调节  $L_0$  的长度来控制。在第 1 跳传输过程中,源节点  $S$  发送数据帧到中继节点  $R_1$ ,如果  $R_1$  正确译码,就将数据帧继续转发至中继节点  $R_2$ ,但当  $R_1$  译码错误时,  $S$  则重发相同数据帧直到  $R_1$  正确译码接收,重复此传输过程直到目的节点  $D$  正确接收数据帧。这里考虑的是 CC-HARQ 协议,在接收端采用最大比合并技术进行译码。则第  $m$  跳节点在第  $l$  轮收到的信号可以表示为

$$y_{m,l} = h_{m,l}x_{m,l} + n_{m,l}, \quad 1 \leq m \leq M \quad (1)$$

其中,  $x_{m,l}$  为第  $m$  跳在第  $l$  轮发送的信号,  $h_{m,l}$  为第  $m$  跳在第  $l$  轮的信道增益;  $n_{m,l}$  为第  $m$  跳在第  $l$  轮的加性高斯白噪声,假设单边功率谱密度为  $N_0$ ,传输单位比特的平均总能量包含平均发送能量  $E_b$  和硬件消耗能量  $E_c$ 。

假设信道为独立的瑞利衰落信道,则信道在一个数据帧传输期间保持不变,但在不同的传输轮次和不同的跳次之间为独立同分布。因此可将信道增益  $h_{m,l}$  建模成方差为  $\sigma_m^2$  的独立零均值高斯复随机变量。若第  $m$  跳的平均重传次数为  $\bar{N}_m$ ,在相同的调制编码方式下,数据传输过程中每跳  $L$  相同,则可定义多跳 HARQ 协议的能量效率为单位能量成功传输的信息比特数目,于是 CC-HARQ 协议的能量效率可以表示为

$$\eta_{EE} = \frac{L}{\sum_{m=1}^M (E_c + E_b)(L + L_0)\bar{N}_m} \quad (2)$$

其中,  $E_b = G_{d,m}N_0\bar{\gamma}_m$ , 为第  $m$  跳的平均发送能量,  $G_{d,m} = G_m d_m^\kappa M_m$  表示第  $m$  跳的等效信道增益<sup>[14]</sup>,  $G_m$  为第  $m$  跳的单位距离信道增益因子,  $d_m$  是第  $m$  跳的相邻两节点间的通信距离,  $\kappa$  是路径损耗因子,  $M_m$  为第  $m$  跳的链路余量,用来补偿硬件处理过程和其它干扰因素带来的损耗。  $\bar{\gamma}_m$  为第  $m$  跳的接收节点收到的信号的平均接收信噪比,在此模型中假设第  $m$  跳的不同传输轮次间的发送功率相等。

## 3 跨层优化设计

### 3.1 问题描述

在进行实际的优化设计前,需要得到一个包含

物理层的发送功率和 MAC 层的发送帧长等参数的多跳 CC-HARQ 系统能量效率的闭合表达式,然而,第  $m$  跳第  $l$  轮因数据帧译码错误导致的平均误帧率  $\text{FER}_{m,l}$  是求解第  $m$  跳的平均重传次数  $\bar{N}_m$  的关键因素。考虑瑞利衰落信道,由前述假设可知第  $m$  跳的瞬时接收信噪比  $\gamma_m$  在同一跳次期间保持恒定,在不同跳次独立同分布。于是  $\gamma_m$  的概率密度函数为

$$p_{\gamma_m}(\gamma_m) = \frac{1}{\bar{\gamma}_m} \exp\left[-\frac{\gamma_m}{\bar{\gamma}_m}\right], \quad \gamma_m \geq 0, 1 \leq m \leq M \quad (3)$$

但在实际中,对每一跳的误帧率的精确计算依赖于  $f(\gamma_m)$  和  $p_{\gamma_m}(\gamma_m)$ , 其中  $f(\gamma_m)$  为当前链路在高速信道下误帧率与瞬时信噪比的函数,在瑞利块衰落信道下,平均误帧率  $\text{FER}_{m,l}$  可以表示为

$$\text{FER}_{m,l} = \int_0^\infty f(\gamma_m) p_{\gamma_m}(\gamma_m) d\gamma_m \quad (4)$$

在实际系统中,  $f(\gamma_m)$  取决于传输网络中的系统调制编码方式、帧长等系统参数,一般不具备解析表达式,因此对于式(4)的求解十分困难,但文献[17]中指出存在阈值  $\omega_0$ , 使得  $f(\gamma_m)$  近似为阶跃函数,此时  $f(\gamma_m)$  可表示为

$$f(\gamma_m) \approx \begin{cases} 1, & \gamma_m \leq \omega_0 \\ 0, & \gamma_m > \omega_0 \end{cases} \quad (5)$$

对于 CC-HARQ 协议,由于在接收节点均采用了最大比合并,因此第  $m$  跳在第  $l$  轮的等效接收信噪比为  $\gamma_{m,l}^G = \sum_{i=1}^l \gamma_{m,i}$ , 利用式(4)和式(5)可得  $\text{FER}_{m,l}$

$$= \int_{\gamma_{m,l}^G \leq \omega_0} \cdots \int p_{\gamma_m}(\gamma_{m,1}) \cdots p_{\gamma_m}(\gamma_{m,l}) d\gamma_{m,1} \cdots d\gamma_{m,l} \quad (6)$$

文献[14]提出了一种基于对数域线性阈值的平均误帧率分析方法,其模型可表示为

$$\omega_0 \approx k \ln(L + L_0) + b \quad (7)$$

其中,  $\omega_0$  为使得式(5)近似为阶跃函数的阈值,  $k, b$  是由实际调制编码方式决定的系统参数,利用该模型可对系统平均误帧率进行近似分析。将式(3)代入式(6),对于瑞利衰落信道有

$$\text{FER}_{m,l} \approx 1 - \exp\left[-\frac{\omega_0}{\bar{\gamma}_m}\right] \sum_{i=0}^{l-1} \frac{1}{i!} \left(\frac{\omega_0}{\bar{\gamma}_m}\right)^i, \quad 1 \leq m \leq M \quad (8)$$

利用式(8)可以进一步分析瑞利衰落信道下 CC-HARQ 协议的能量效率,CC-HARQ 协议在第  $m$  跳第  $l$  轮成功解码的概率为  $\text{FER}_{m,l-1} - \text{FER}_{m,l}$ , 特别地有  $\text{FER}_{m,0} = 1$ 。则第  $m$  跳的平均重传次数为

$$\bar{N}_m = \sum_{l=1}^{\infty} l (\text{FER}_{m,l-1} - \text{FER}_{m,l}) = 1 + \sum_{l=1}^{\infty} \text{FER}_{m,l} \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)后交换求和次序有

$$\begin{aligned} \bar{N}_m &\approx 1 + \exp\left[-\frac{\omega_0}{\bar{\gamma}_m}\right] \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{i=l}^{\infty} \frac{1}{i!} \left(\frac{\omega_0}{\bar{\gamma}_m}\right)^i \\ &\approx 1 + \exp\left[-\frac{\omega_0}{\bar{\gamma}_m}\right] \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(i-1)!} \left(\frac{\omega_0}{\bar{\gamma}_m}\right)^i = 1 + \frac{\omega_0}{\bar{\gamma}_m} \quad (10) \end{aligned}$$

结合式(2),式(7),式(10)可以得到包含 PHY 层的平均接收信噪比和 MAC 层发送帧长等参数的能量效率的闭合表达式为

$$\eta_{\text{EE}} = L \left/ \left[ \sum_{m=1}^M (E_c + G_{d,m} N_0 \bar{\gamma}_m) (L + L_0) \cdot \left( 1 + \frac{k \ln(L + L_0) + b}{\bar{\gamma}_m} \right) \right] \right. \quad (11)$$

对于确定的信道,其  $\sigma_m^2$  是固定的,可用每一跳的平均接收信噪比  $\bar{\gamma}_m = P_m \sigma_m^2 / N_0$  来表征第  $m$  跳的发送节点的发送功率  $P_m$  的分配情况,从而简化系统分析。因此为了使得 CC-HARQ 协议的能量效率最大化,我们从跨层的角度来优化  $L$  和  $\bar{\gamma}_m$ 。本文的优化问题可以描述为

$$\max_{\bar{\gamma}_m, L} \eta_{\text{EE}}, \quad \text{s.t. } L > 0, \bar{\gamma}_m > 0, 1 \leq m \leq M \quad (12)$$

### 3.2 发送帧长优化

考虑固定在第  $m$  跳的发送功率  $P_m$ , 即第  $m$  跳的平均接收信噪比  $\bar{\gamma}_m$  一定时,设计最优发送帧长策略,此时的优化问题式(12)可以简化为

$$\eta_{\text{EE}} = \frac{L}{\sum_{m=1}^M (E_c + E_b) (L + L_0) \left( 1 + \frac{k \ln(L + L_0) + b}{\bar{\gamma}_m} \right)} \quad (13)$$

$$\max_L \eta_{\text{EE}}, \quad \text{s.t. } L > 0, \bar{\gamma}_m > 0, 1 \leq m \leq M$$

由于接收信噪比  $\bar{\gamma}_m$  给定,此时对可变帧长 CC-HARQ 协议的  $\eta_{\text{EE}}$  关于  $L$  求一阶偏导可得

$$\frac{\partial \eta_{\text{EE}}}{\partial L} = \frac{L_0 \sum_{m=1}^M K_m - kL \sum_{m=1}^M \frac{(E_c + E_b)}{\bar{\gamma}_m}}{(L + L_0)^2 \left( \sum_{m=1}^M K_m \right)^2} \quad (14)$$

$$K_m = (E_c + E_b) \left( 1 + \frac{k \ln(L + L_0) + b}{\bar{\gamma}_m} \right)$$

令  $\partial \eta_{\text{EE}} / \partial L = 0$ , 可得

$$\sum_{m=1}^M \left[ L_0 (\bar{\gamma}_m + k \ln(L + L_0) + b - kL) \right] \frac{(E_c + E_b)}{\bar{\gamma}_m} = 0 \quad (15)$$

于是由式(15)可求得最优帧长为

$$L^* = -L_0 W \left( -\frac{1}{L_0} \exp\left[-\frac{\sum_{m=1}^M (E_c + E_b)}{\sum_{m=1}^M \frac{(E_c + E_b)}{\bar{\gamma}_m} + k + b} \right] / k \right) - L_0 \quad (16)$$

其中  $W(z)$  为朗伯函数, 定义为  $xe^x = z$  的解, Francois 等人在文献[18]中提出了估计朗伯函数值的数值方法, 因为需满足  $L^* > 0$  的限制, 朗伯函数在这里取分支  $W_{-1}$ , 利用式(16)即可调整发送帧长达到最大化 CC-HARQ 协议能量效率的目的。

### 3.3 平均接收信噪比优化

和发送帧长优化设计类似, 这里考虑在发送帧长一定时, 求解每一跳的最优发送功率使得多跳 CC-HARQ 系统能量效率最大化, 此时优化问题式(12)可以描述为

$$\eta_{\text{EE}} = \frac{L}{\sum_{m=1}^M (E_c + G_{d,m} N_0 \bar{\gamma}_m) (L + L_0) \left(1 + \frac{\omega_0}{\bar{\gamma}_m}\right)} \quad (17)$$

$$\max_{\bar{\gamma}} \eta_{\text{EE}}, \quad \text{s.t. } L > 0, \bar{\gamma}_m > 0, 1 \leq m \leq M$$

当发送帧长一定时, 为简化分析, 优化问题式(17)可以等效为

$$\min_{\bar{\gamma}} f(\bar{\gamma}) = \min_{\bar{\gamma}} \sum_{m=1}^M (E_c + G_{d,m} N_0 \bar{\gamma}_m) \left(1 + \frac{\omega_0}{\bar{\gamma}_m}\right) \quad (18)$$

$$\text{s.t. } \bar{\gamma}_m > 0, 1 \leq m \leq M$$

发送功率的优化问题需考虑在没有功率约束和有功率约束情况下的最优发送功率分配方案, 文献[1]分析了在这两种情况下的系统吞吐量的最大化问题。首先, 针对无功率约束的情况, 即实际系统所提供的功率足够大时对最优发送功率进行分析, 此时优化问题同式(18), 利用  $f(\bar{\gamma})$  对  $\bar{\gamma}_m$  求一阶偏导:

$$\frac{\partial f}{\partial \bar{\gamma}_m} = G_{d,m} N_0 \left(1 + \frac{\omega_0}{\bar{\gamma}_m}\right) + (E_c + G_{d,m} N_0 \bar{\gamma}_m) \cdot \left(-\frac{\omega_0}{\bar{\gamma}_m^2}\right) = G_{d,m} N_0 - \frac{E_c \omega_0}{\bar{\gamma}_m^2}$$

令  $\partial f / \partial \bar{\gamma}_m = 0$ , 可得到最优平均接收信噪比:

$$\bar{\gamma}_m^* = \sqrt{\frac{\omega_0 E_c}{G_{d,m} N_0}}, \quad 1 \leq m \leq M \quad (19)$$

式(19)给出了无功率约束下的最优平均接收信噪比的闭合表达式。

对于有功率约束的情况, 即要求  $\sum_{m=1}^M \bar{\gamma}_m \leq \gamma_0$  时, 使得能量效率最大化的功率分配问题可以表示为

$$\min_{\bar{\gamma}} f(\bar{\gamma}) = \min_{\bar{\gamma}} \sum_{m=1}^M (E_c + G_{d,m} N_0 \bar{\gamma}_m) \left(1 + \frac{\omega_0}{\bar{\gamma}_m}\right) \quad (20)$$

$$\text{s.t. } \bar{\gamma}_m > 0, \sum_{m=1}^M \bar{\gamma}_m \leq \gamma_0, 1 \leq m \leq M$$

给定  $\gamma_0$ , 若根据式(19)求得的  $\bar{\gamma}_m^*$  满足  $\sum_{m=1}^M \bar{\gamma}_m^* \leq \gamma_0$ , 此时对最优平均接收信噪比的求解等价于无功率约束的情况, 否则很容易验证优化问题式(20)

是凸的, 最优解在边界条件上取得, 此时可以构建拉格朗日函数求解该优化问题。

$$L(\bar{\gamma}, \lambda) = \sum_{m=1}^M (E_c + G_{d,m} N_0 \bar{\gamma}_m) \left(1 + \frac{\omega_0}{\bar{\gamma}_m}\right) + \lambda \left(\sum_{m=1}^M \bar{\gamma}_m - \gamma_0\right)$$

其中,  $\lambda$  为拉格朗日乘子, 同样地, 由  $\partial L(\bar{\gamma}, \lambda) / \partial \bar{\gamma}_m = 0$  可以得到

$$\lambda = \frac{E_c \omega_0}{\bar{\gamma}_m^2} - G_{d,m} N_0 \quad (21)$$

$$\bar{\gamma}_m^* = \sqrt{\frac{\omega_0 E_c}{G_{d,m} N_0 + \lambda}}, \quad 1 \leq m \leq M \quad (22)$$

将式(22)代入  $\sum_{m=1}^M \bar{\gamma}_m = \gamma_0$ , 因  $\bar{\gamma}_m^*$  的非线性使得  $M \geq 2$  时很难求解出  $\lambda$  的解析表达式, 因此本文提出一种低复杂度的最优功率搜索算法来求解  $\bar{\gamma}_m^*$ 。注意到对于任意  $\bar{\gamma}_m, 1 \leq m \leq M$  有  $0 < \bar{\gamma}_m \leq \gamma_0$ , 同时由于  $\sum_{m=1}^M \bar{\gamma}_m = \gamma_0$ , 必然存在某一跳的接收信噪比  $\bar{\gamma}_k$  满足  $\bar{\gamma}_k \geq \gamma_0 / M$ , 结合式(21)可以取

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{\min} &= \max_{1 \leq i \leq M} \frac{E_c \omega_0}{\gamma_0^2} - G_{d,i} N_0 \\ \lambda_{\max} &= \max_{1 \leq j \leq M} \frac{E_c \omega_0}{(\gamma_0 / M)^2} - G_{d,j} N_0 \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

所设计的具体最优功率搜索算法在表 1 中的算法 1 进行了详细的说明, 算法 1 由于采用搜索算法, 目前还没有很好的理论对收敛性进行证明, 其收敛性的验证需要依据实际系统给出的  $\gamma_0$  在仿真中进行。

### 3.4 联合优化

在求解联合最优发送帧长和发送功率时, 同样需要考虑在无功率约束和存在功率约束两种情况下

表 1 CC-HARQ 协议的最优功率搜索算法

算法 1 多跳 CC-HARQ 协议的最优功率搜索算法

1. 给定初始发送帧长  $L$ , 总信噪比约束  $\gamma_0$  和最大误差容限  $\varepsilon$ ;
2. 根据式(19)计算  $\bar{\gamma}_m, 1 \leq m \leq M$ ;
3. 判断是否满足  $\sum_{i=1}^M \bar{\gamma}_i \leq \gamma_0$ , 若满足则跳至步骤 7, 否则转至步骤 4;
4. 根据式(23)计算初始拉格朗日系数  $\lambda_{\min}$  和  $\lambda_{\max}$ ;
5. 令  $\lambda = (\lambda_{\min} + \lambda_{\max}) / 2$ , 根据式(22)计算  $\bar{\gamma}_m, 1 \leq m \leq M$ ;
6. 判断是否满足  $|\sum_{i=1}^M \bar{\gamma}_i - \gamma_0| \leq \varepsilon$ , 若满足则跳至步骤 7, 否则判断:
  - (1) 若  $\sum_{i=1}^M \bar{\gamma}_i - \gamma_0 < 0$ , 取  $\lambda_{\max} = \lambda$  并转至步骤 5;
  - (2) 若  $\sum_{i=1}^M \bar{\gamma}_i - \gamma_0 > 0$ , 取  $\lambda_{\min} = \lambda$  并转至步骤 5;
7. 输出当前的最优信噪比  $\bar{\gamma}^* = [\bar{\gamma}_1^* \bar{\gamma}_2^* \cdots \bar{\gamma}_m^* \cdots \bar{\gamma}_M^*]$ 。

最大化多跳 CC-HARQ 系统能量效率的优化策略。然而，无论有无功率约束，理论上联合最优的发送帧长  $\tilde{L}$  和接收信噪比  $\tilde{\gamma}_m$  都可以通过迭代求解式(16)和式(19)，式(16)和式(22)得到，但式(16)不是闭合的，需要求解  $M$  维的非线性方程，计算复杂度十分庞大。因此，本文提出了一种低复杂度的交替迭代优化算法寻找联合最优的  $(\tilde{L}, \tilde{\gamma}_m)$ ，同时在表 2 的算法 2 中也对该联合优化算法进行了阐述。

表 2 多跳 CC-HARQ 协议中联合最优帧长和接收信噪比的交替迭代算法

算法 2 多跳 CC-HARQ 协议中联合最优帧长和接收信噪比的交替迭代算法
1. 给定初始总信噪比约束 $\gamma_0$ 、迭代循环计数 $i = 0$ 和最大误差容限 $\varepsilon$ ；
2. 初始化接收信噪比序列 $\bar{\gamma}^{(0)} = [\bar{\gamma}_1^{(0)} \bar{\gamma}_2^{(0)} \dots \bar{\gamma}_m^{(0)} \dots \bar{\gamma}_M^{(0)}]$ ，其中 $\bar{\gamma}_m^{(0)} = \gamma_0 / M$ ， $1 \leq m \leq M$ ，根据式(16)计算最优帧长 $L^{(0)}$ ，再根据式(11)计算对应的能量效率 $\eta_{EE}^{(0)}$ ；
3. 循环以下迭代过程：
(1) 利用 $L^{(i)}$ 代入式(19)或根据算法 1 求得 $\lambda$ 后代入式(22) 计算 $\bar{\gamma}^{(i+1)}$ ；
(2) 将更新后的 $\bar{\gamma}^{(i+1)}$ 代入式(16)计算 $L^{(i+1)}$ ；
(3) 根据式(11)计算相应的能量效率 $\eta_{EE}^{(i)}$ ；
(4) 更新迭代循环计数 $i = i + 1$ ；
4. 判断是否满足 $ \eta_{EE}^{(i)} - \eta_{EE}^{(i-1)}  \leq \varepsilon$ ，若满足则停止迭代，否则返回步骤 3；
5. 输出当前的联合最优发送帧长和信噪比组合 $(\tilde{L}, \tilde{\gamma}_m)$ 。

关于算法 2 收敛性的说明：在式(19)和算法 1 成立的条件下，可以证明在算法 2 第 3 步中，由  $(L^{(i)}, \bar{\gamma}^{(i+1)})$  组合计算得出的能量效率是优于  $(L^{(i)}, \bar{\gamma}^{(i)})$  组合的， $(L^{(i+1)}, \bar{\gamma}^{(i+1)})$  组合计算得出的能量效率是优于  $(L^{(i)}, \bar{\gamma}^{(i+1)})$  组合的，随着迭代轮次的增加，最终一定会存在组合  $(L^{(i+1)}, \bar{\gamma}^{(i+1)})$  使其达到全局最优的  $(\tilde{L}, \tilde{\gamma}_m)$ ，此时  $(L^{(i+1)}, \bar{\gamma}^{(i+1)})$  和  $(L^{(i)}, \bar{\gamma}^{(i)})$  计算得到的能量效率相等，从而算法 2 达到收敛。

#### 4 仿真实验

基于跨层设计的最优发送帧长策略、最优发送功率分配策略及提出的联合优化方案，本文将给出数值结果来考察所推导的多跳中继网络中 CC-HARQ 协议的能量效率在不同优化策略和仿真条件下的性能。考虑多跳中继网络为两跳的情形，即  $M = 2$ ，部分参数的设置是依照文献[5]，其中硬件消耗能量  $E_c = 0.01$  J，与信道增益相关的单位距离信道增益因子  $G_1 = 30$  dB， $G_2 = 25$  dB，节点距离

第 1 跳  $d_1 = 100$  m，距离第 2 跳  $d_2 = 200$  m，路径损耗因子  $\kappa = 3.5$ ，链路余量  $M_1 = 40$  dB， $M_2 = 45$  dB，加性高斯白噪声的单边功率谱密度  $N_0 = -171$  dBm/Hz，控制比特  $L_0 = 20$  bit，在仿真中将验证能量效率优化方案的有效性。

图 2 给出了在不同的接收信噪比下 CC-HARQ 系统的能量效率和发送帧长的关系。本文考虑了两种调制编码下的情形，其中 MCS-1 为采用 1/2 卷积码编码的 QPSK 调制方案，系统参数  $k_1 = 0.207$ ， $b_1 = 0.140$ ，MCS-2 为未编码的 QPSK 调制方案，系统参数  $k_2 = 0.931$ ， $b_2 = -1.223$ ，假设每一跳的平均接收信噪比相同，分别为 2 dB，5 dB，10 dB，从图中可以看出在相同的发送帧长的条件下，采用调制编码方案的 CC-HARQ 系统的能量效率性能明显优于未编码的调制方案；而且，根据式(16)所设计的最优帧长策略在不同的情况下，其能量效率性能均达到最优，在图中用“o”进行了标记，从而验证了最优帧长策略的有效性。

从图 2 可以看到，当每一跳的平均接收信噪比越大时，最优发送帧长也越长；另外，当发送帧长小于最优发送帧长时，增加发送帧长可以提高能量效率；当发送帧长大于最优帧长时，在平均接收信噪比较小的条件下，增加发送帧长会引起平均误帧率变大，从而导致更多能量消耗在重传过程中，使得能量效率性能有较大下降，但在平均接收信噪比较大时，传输过程中平均误帧率随  $L$  增加恶化较小，性能下降相对不明显。因此，CC-HARQ 系统的能量效率对低信噪比下的发送帧长变化更为敏感。

图 3 和图 4 分别给出了无总功率约束和有总功率约束条件下，在不同的发送帧长下 CC-HARQ 系统的能量效率和第 1 跳平均接收信噪比的关系。设置发送帧长依次为 100 bit，1000 bit，5000 bit，所采用的调制编码类型和图 2 相同，可以看到在相同的  $\bar{\gamma}_1$  的条件下，采用 MCS-1 方案的 CC-HARQ 系统的能量效率性能明显优于 MCS-2 方案；同样地，根据式(19)和式(22)所设计的最优发送功率分配策略在不同的情况下，其能量效率性能均达到最优，在图中用“o”进行了标记，从而验证了最优发送功率分配策略的有效性。

在图 3 中，因为没有总功率约束，当发送帧长越大时，由式(7)和式(19)可知第 1 跳最优平均接收信噪比  $\bar{\gamma}_1^*$  和第 2 跳最优平均接收信噪比  $\bar{\gamma}_2^*$  也越大，然而在图 4 中，给定  $\gamma_0 = 6$  dB，因为有总功率的限制，即由式(19)求得的  $\bar{\gamma}_m^*$  满足  $\sum_{m=1}^M \bar{\gamma}_m^* > \gamma_0$ ，当发送帧长越大时， $\bar{\gamma}_1^*$  越小，因为最优解在边界条件取得，满足  $\bar{\gamma}_1^* + \bar{\gamma}_2^* = \gamma_0$ ，可知此时  $\bar{\gamma}_2^*$  越大；无论

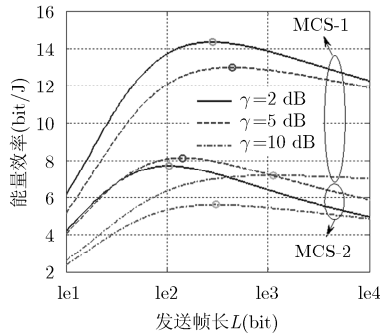


图 2 多跳CC-HARQ协议能量效率与发送帧长的关系

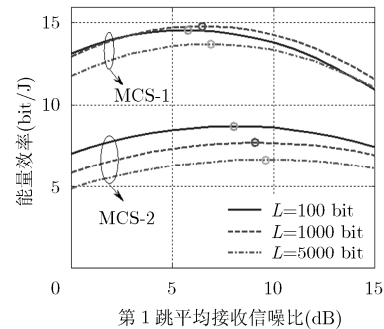


图 3 多跳CC-HARQ协议能量效率与 $\bar{\gamma}_1$ 的关系(无功率约束)

有无功率约束, 当 $\bar{\gamma}_1 < \bar{\gamma}_1^*$ 时, 此时因为每一跳的误帧率较大使得能量主要消耗在重传的过程, 因此增大发送功率可以降低误帧率从而提高能量效率, 但图 3 中当 $\bar{\gamma}_1 > \bar{\gamma}_1^*$ 时, 此时误帧率已经足够小, 重传的影响几乎可以忽略, 随着平均接收信噪比的增加反而会导致能量的浪费从而降低能量效率。

图 5 给出了多跳 CC-HARQ 协议所提优化策略和传统的固定帧长、等接收信噪比策略的能量效率性能对比。图中横坐标代表总的平均接收信噪比限制, 其中“Opt  $L$  and Opt  $\gamma$ ”代表最优帧长和接收信噪比联合优化策略, “Opt  $L$  and E  $\gamma$ ”代表等接收信噪比的最优帧长策略, “ $L=1000$  bit and Opt  $\gamma$ ”代表固定帧长的最优接收信噪比策略, “ $L=1000$  bit and E  $\gamma$ ”代表等接收信噪比的固定帧长策略, 采用的是 1/2 卷积码编码的 QPSK 调制方案。

从图 5 中可以看出最优帧长和接收信噪比的联合优化策略的能量效率性能优于其它所有的策略。在低信噪比区域, 无论采用哪种策略, 都是随着总功率的增加, CC-HARQ 系统能量效率相应增大, 这是因为在低信噪比区域, 误帧率较大, 能量消耗在重传过程中, 增大发送功率可以提升能量效率; 然而在高信噪比区域, 对于联合优化策略和固定帧长的最优接收信噪比策略来说, 因系统提供的功率

足够大, 可以等价为无功率约束的情形, 此时可以通过调整每一跳的平均接收信噪比以使系统能量效率达到最优, 其可以获得的最大能量效率分别为 15.255 bit/J 和 14.772 bit/J, 而采用等接收信噪比的最优帧长策略和固定帧长策略在高信噪比区域因误帧率已经足够小, 增大发送功率会导致能量的浪费反而使得能量效率性能恶化。

总之, 采用联合优化策略能使得多跳 CC-HARQ 协议的能量效率获得显著提升, 说明在多跳 CC-HARQ 协议中进行最优发送帧长和接收信噪比的联合优化设计十分必要。进一步, 我们发现仿真中使能量效率收敛的最大迭代次数仅为 3 次, 联合优化算法实现可行性强。

## 5 结束语

本文研究了最大化多跳中继网络中 CC-HARQ 协议的能量效率的跨层优化策略。考虑瑞利衰落信道中的多跳中继网络, 设计了最优发送帧长策略, 最优发送功率分配方案和联合优化策略, 并给出了相应的最优帧长表达式和低复杂度的搜索算法。通过仿真可以发现, 本文所提出的优化策略方案的确可以有效提升 CC-HARQ 系统的能量效率性能, 其中最优发送帧长和接收信噪比的联合优化策略可以使系统获得最大的能量效率性能增益, 其迭代优化

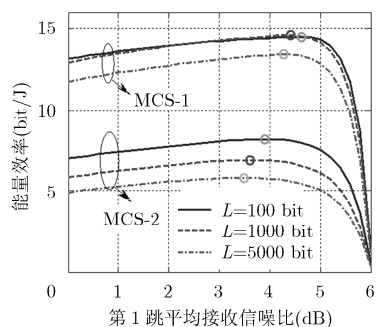


图 4 多跳 CC-HARQ 协议能量效率与 $\bar{\gamma}_1$ 的关系(有功率约束)

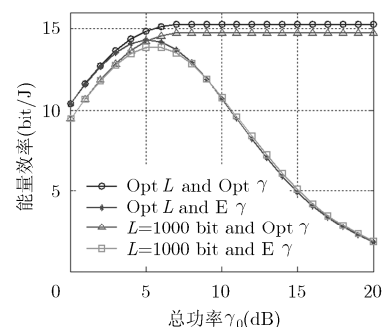


图 5 多跳 CC-HARQ 协议联合优化策略的能量效率

算法复杂度也相对较低；同时对于 CC-HARQ 系统的能量效率来说，进行发送功率的优化比对发送帧长的优化更加关键，并且能量效率在低信噪比条件下对发送帧长的变化更为敏感。理论分析和仿真结果都表明了跨层设计的优化方案对于显著提高多跳 CC-HARQ 中继网络的能量效率的必要性与可行性。

### 参 考 文 献

- [1] KIM S H, LEE S J, and SUNG D K. HARQ rate selection schemes in a multihop relay network with a delay constraint [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(6): 2333-2348.
  - [2] KIM S H and JUNG B C. On the joint power and rate optimization in multihop relay networks with HARQ[C]. 2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), London, UK, 2013: 1406-1410.
  - [3] KIM S H and JUNG B C. On the optimal link adaptation in linear relay networks with incremental redundancy HARQ[J]. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(8): 1411-1414.
  - [4] MANHAS E B, PELLENZ M E, BRANTE G, *et al.* Energy efficiency analysis of HARQ with chase combining in multihop wireless sensor networks[C]. 2014 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC), Maderia, Sweden, 2014: 1-6.
  - [5] CUI S, GOLDAMITH A J, and BAHAI A. Energy-constrained modulation optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(5): 2349-2360.
  - [6] COSTA F M and OCHIAI H. Energy-efficient physical layer design for wireless sensor network links[C]. 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC), Kyoto, Japan, 2011: 1-5.
  - [7] YE W, HEIDAMANN J, and ESTRIN D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2004, 12(3): 493-506.
  - [8] EL GAMAL A, NAIR C, PRABHAKAR B, *et al.* Energy-efficient scheduling of packet transmissions over wireless networks[C]. IEEE Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies Proceedings, INFOCOM 2002, New York, USA, 2002: 1773-1782.
  - [9] SANKARASUBRAMANIAM Y, AKYILDIZ I F, and MCHUGHLIN S W. Energy efficiency based packet size optimization in wireless sensor networks[C]. Proceedings of the First IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications, Anchorage, AK, USA, 2003: 1-8.
  - [10] CHAITANYA T V and LE-NGOC T. Adaptive power allocation for chase combining HARQ based low-complexity MIMO systems[C]. 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), New Orleans, LA, USA, 2015: 771-776.
  - [11] RAMIS J and FEMENIAS G. Cross-layer design of adaptive multirate wireless networks using truncated HARQ[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(3): 944-954.
  - [12] WANG Gang, WU Jingxian, and ZHENG Y R. Cross-layer design of energy efficient coded ARQ systems[C]. 2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Anaheim, CA, USA, 2012: 2351-2355.
  - [13] LIU S, WU X, XI Y, *et al.* On the throughput and optimal packet length of an uncoded ARQ system over slow Rayleigh fading channels[J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(8): 1173-1175.
  - [14] WU Jingxian, WANG Gang, and ZHENG Y R. Energy efficiency and spectral efficiency tradeoff in type-I ARQ systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(2): 356-366.
  - [15] GE Songhu, XI Yong, ZHAO Haitao, *et al.* Energy efficient optimization for CC-HARQ over block Rayleigh fading channels[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(10): 1854-1857.
  - [16] XI Yong, ALISTER B, WEI Jibo, *et al.* A general upper bound to evaluate packet error rate over quasi-static fading channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(5): 1373-1377.
  - [17] CHATZIGEORGIOU I, WASSELL I J, and CARRASCO R. On the frame error rate of transmission schemes on quasi-static fading channels[C]. 42nd Annual Conference on Information Sciences and Systems, Princeton, NJ, USA, 2008: 577-581.
  - [18] FRANCOIS C B and ABDELILAH M. Numerical evaluation of the Lambert W function and application to generation of generalized Gaussian noise with exponent 1/2[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, 50(9): 2160-2165.
- 肖 博： 男，1992 年生，博士生，研究方向为现代通信技术、MAC 协议优化设计。
- 习 勇： 男，1977 年生，副研究员，硕士生导师，研究方向为现代通信技术、MAC 协议优化、软件无线电。
- 韩君妹： 女，1989 年生，博士生，研究方向为无线网络资源优化、协同中继技术、HARQ 协议。
- 葛松虎： 男，1987 年生，讲师，研究方向为无线通信网络。