

• 3.A Comparison of Energy-Efficient HARQ Protocols for M2M Communication in the Finite Block-Length Regime

- 作者: Marco Centenaro, Student Member , IEEE, Giulio Ministeri, Student Member , IEEE, and Lorenzo V angelista, Senior Member , IEEE
- 期刊:
- 摘要: 摘要混合自动重传请求 (HARQ) 技术主要用于无线通信系统的上下文中, 尤其是在最近几年中, 被用于最新的蜂窝系统, 包括长期演进 (LTE) 标准。此类方案已在文献中得到广泛研究; 然而, 在本文中, 我们感兴趣的是将PolyanskiyPoor-Verdú的结果应用于有限块长度方案, 比较绿色通信环境下 (即, 在能效是关键性能指标的情况下) 类型I和类型II HARQ方案的性能。
- 这方面的一个突出例子是机器对机器 (M2M) 通信, 预计它将作为物联网 (IoT) 范式的推动者发挥根本作用。我们推导了一种新的、最优的功率分配策略, 并提供了仿真结果, 表明如果我们在接收器侧启用分组合并, 可以实现至少40%的节能
- 关键词

系统模型

- 假设从字母表 M 中取出每个发送的符号, 并且将 b 个信息符号编码为属于集合 M^L 的码字, 使用 L 个信道的码字来发送, 码字速率为

$$R = \frac{\log_2 |\mathcal{M}|^b}{L} = \frac{b}{L} \text{ bpcu} \quad (1)$$

h 服从瑞利分布, 衰落过程在每个传输码字上是平坦的, 并且衰落实现在不同块之间是独立的。 $g = |h|^2$ 均值 $\lambda = 1$, 噪声功率 $\sigma_w^2 = 1$, 由可知传输速率、香农容量和错误概率之间的关系由下式

$$R = C - \sqrt{\frac{V}{L}} \cdot Q^{-1}(\epsilon) + \frac{1}{2} \cdot \frac{\log_2 L}{L} + \mathcal{O}(1) \quad (2)$$

其中 $C = \frac{1}{2} \log_2(1 + \Gamma)$, 信道色散为

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\Gamma(\Gamma + 2)}{(\Gamma + 1)^2} (\log_2 e)^2 \\ &= \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{(\Gamma + 1)^2} \right] (\log_2 e)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

通带信道香农容量和信道色散必须乘以2,

- 给定 L, R, P, g 可得解码错误概率为

$$\phi \approx \mathbb{E}_g \left[Q \left(\frac{\sqrt{L} \log_2(1 + gP) + \frac{1}{2} \cdot \frac{\log_2 L}{L} - R}{\sqrt{1 - \frac{1}{(1+gP)^2} \log_2 e}} \right) \right] \quad (4)$$

设 M 为重传最大次数, P_m 为表示第 M 次传输中使用的传输功率, Φ_m 表示直到第 M 次尝试传输才正确解码数据的概率, $\Phi_0 = 1$ 。平均消耗能量定义为

$$\bar{\xi} = L \cdot \sum_{m=1}^M P_m \cdot \Phi_{m-1} \quad (5)$$

信道使用的预期数量，即平均延迟为

$$\bar{\tau} = L \cdot \sum_{m=1}^M \Phi_{m-1} \quad (6)$$

使用**更新奖励理论**获得平均传输功率

$$\bar{P} = \frac{\bar{\xi}}{\bar{\tau}} = \frac{\sum_{m=1}^M P_m \cdot \Phi_{m-1}}{\sum_{m=1}^M \Phi_{m-1}} \quad (7)$$

- 设计了一个类似的优化问题来研究 *I*-HARQ, *CC* - HARQ 和 *IR* - HARQ 进程之间的性能差距

$$\min_{P_m} \Phi_M \quad (8)$$

$$\text{subject to } \bar{\xi} = J \quad (8)$$

$$P_{\min} \leq P_m \leq P_{\max} \quad (8)$$

在间隔 $[P_{\min}, P_{\max}]$ 中强制发送功率 P_m ，这是真实设备的常见约束。这样得到了平均消耗能量 $\bar{\xi}$ 上下界

$$\bar{\xi} = L \cdot \sum_{m=1}^M P_m \cdot \Phi_{m-1} \geq L \cdot \sum_{m=1}^M P_{\min} \cdot \Phi_{m-1} \geq L \cdot P_{\min} \triangleq J_{\min} \quad (9)$$

$$\bar{\xi} = L \cdot \sum_{m=1}^M P_m \cdot \Phi_{m-1} \leq L \cdot \sum_{m=1}^M P_{\max} \cdot \Phi_{m-1} \leq L \cdot P_{\max} \cdot M \triangleq J_{\max} \quad (10)$$

Type-I HARQ

- 接收端尝试只解码最后接收到的包，丢弃之前接收到的信息，得到

$$\Phi_m^{(TI)} = \begin{cases} \prod_{j=1}^m \phi_j & m \neq 0 \\ 1 & m = 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中， ϕ_j 是在第 j 次传输尝试中数据未被解码的概率， $\phi_j = \mathbb{E}_g[\epsilon(L, R, gP_j)]$

CC-HARQ

- 接收到的包使用利用最大比率组合（MRC）完成分组的组合，第 j 次传输尝试后的有效 *SNR* 为

$$\Gamma_j^{(CC)} = \sum_{\alpha=1}^j \Gamma_{\alpha} = \sum_{\alpha=1}^j \frac{g_{\alpha} P_a}{\sigma_w^2} \quad (12)$$

第 j 次传输尝试时的解码错误概率 $\phi_j^{(CC)}$ 表示

$$\begin{aligned} \phi_j^{(CC)} &= \mathbb{E}_{g_1, \dots, g_j} \left[\epsilon \left(L, R, \sum_{\alpha=1}^j g_{\alpha} P_{\alpha} \right) \right] \\ &= \int_0^{+\infty} \cdots \int_0^{+\infty} \epsilon \left(L, R, \sum_{\alpha=1}^j g_{\alpha} P_{\alpha} \right) e^{-\sum_{\alpha=1}^j g_{\alpha}} dg \end{aligned} \quad (13)$$

j integrals

这里利用了独立块衰落过程的假设

$$f_{g_1, \dots, g_j}(g_1, \dots, g_j) = f_{g_1}(g_1) \cdots f_{g_m}(g_m) = \exp\left(-\sum_{i=1}^m g_i\right) \quad (14)$$

因此，第 m 次传输尝试的中断概率为

$$\Phi_m^{(CC)} = \begin{cases} \prod_{j=1}^m \phi_j^{(CC)} & m \neq 0 \\ 1 & m = 0 \end{cases} \quad (15)$$

IR-HARQ

- 采用 L 个信道用于传输的原始码字被划分为 L/M 个子码字，其中 M 是传输尝试的最大次数。我们可以使用具有瑞利衰落的 M 并行AWGN信道[14]来模拟这种情况。公式(29)可得

$$R_j = C_j - \sqrt{\frac{V_j}{L/M}} \cdot Q^{-1}(\epsilon) + \frac{1}{2} \cdot \frac{\log_2 L/M}{L/M} + \mathcal{O}(1) \quad (16)$$

其中累计信道容量 C_j 为

$$C_j = \sum_{\alpha=1}^j C(g_\alpha P_\alpha) \quad (17)$$

累积信道色散 V_j 为

$$V_j = \sum_{\alpha=1}^j V(g_\alpha P_\alpha) \quad (18)$$

其中 P_1, \dots, P_j 为发射功率， $g_1 \cdots g_j$ 为信道增益。

- 假设 FEC 码的母码率为 $R = b/L$ ，第 j 次传输尝试后的信息速率为

$$R_j = \frac{b}{j \cdot \frac{L}{M}} = R \cdot \frac{M}{L} \quad (19)$$

而 $R_M \equiv R$ ，因此误差概率为

$$\epsilon_j^{(IR)} \approx Q\left(\frac{C_j + 0.5 \frac{\log_2 L/M}{L/M} - R_j}{\sqrt{V_j/L/M}}\right) \quad (20)$$

因此在第 j 次传输尝试的解码错误概率表示为

$$\begin{aligned} \phi_j^{(IR)} &= \mathbb{E}_{g_1, \dots, g_j} [\epsilon_j^{(IR)}] \\ &= \int_0^{+\infty} \cdots \int_0^{+\infty} \epsilon_j^{(IR)} e^{-\sum_{\alpha=1}^j g_\alpha} dg \end{aligned} \quad (21)$$

$j \text{ integrals}$

第 m 次传输尝试时的中断概率为

$$\Phi_m^{(IR)} = \begin{cases} \prod_{j=1}^m \phi_j^{(IR)} & m \neq 0 \\ 1 & m = 0 \end{cases} \quad (22)$$

性能评估

中断概率

- 为了减少支持数据重传所需的缓冲量，成本和延迟敏感机器类型设备来说是一个非常重要的限制，取 $L \in \{50, 200\}$, $M = 2$ ，如下图展示了中断概率 Φ_M 和平均消耗能量 $\bar{\xi}$ 的比较。

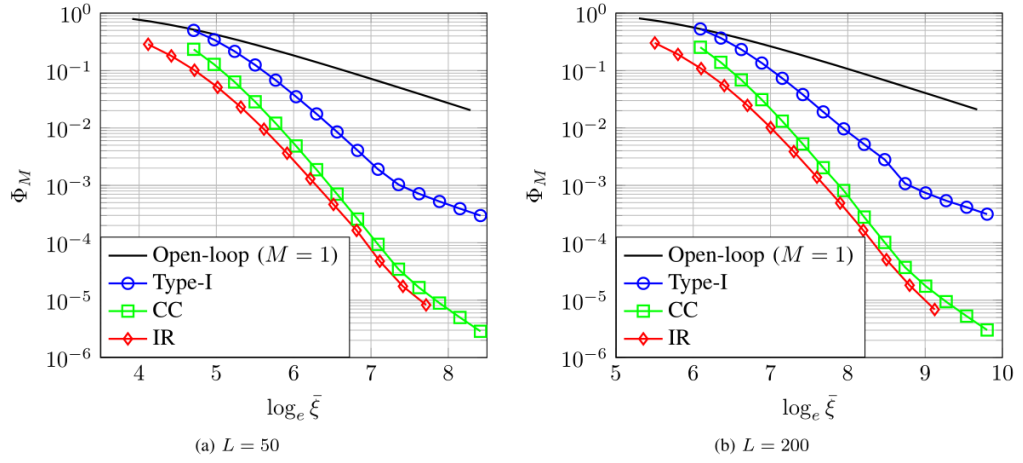


Fig. 2: Outage probability Φ_M vs average consumed energy $\bar{\xi}$ for $L \in \{50, 200\}$. Note that $\bar{\xi}$ is represented in logarithmic scale.

可知 $IR - HARQ$ 具有最佳性能， $\bar{\xi}$ 在对数尺度变化是 $\ln(200/50) \approx 1.4$

功率分配

- 下图展示了 M 次传输尝试的功率分配与 $L = 50$ 时的平均消耗能量 $\bar{\xi}$

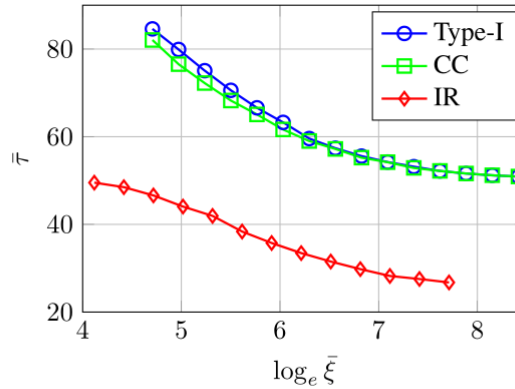


Fig. 4: Average number of channel uses $\bar{\tau}$ for Type-I, CC, and IR HARQ vs average consumed energy $\bar{\xi}$, when $L = 50$.

对于两种 $TypeII - HARQ$ 过程，当能量预算 $\bar{\xi}$ 较低时，最好的做法是在第一次传输尝试时分配更多的功率，即 $P_1 > P_2$ 。当可用能量较高时，特别是使用 CC 当 $\ln \bar{\xi} > 5$ 和使用 IR 当 $\ln \bar{\xi} > 5.3$ 时，更优的方案是在第二次传输尝试上分配更多的功率即 $P_1 < P_2$ 。

交付延时

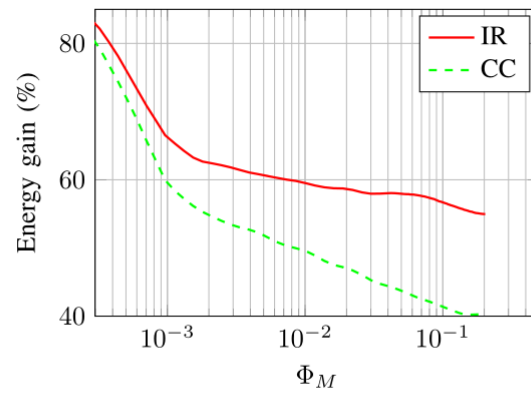


Fig. 5: Energy gap of CC HARQ and IR HARQ with respect to Type-I HARQ vs outage probability Φ_M for $L = 50$.

能效

结论: $IR - HARQ$ 在节能方面总是优于 $CC - HARQ$ 。