

基于帧重要性认知的网络差错控制策略

乐德广¹, 靳勇¹, 郭东辉², 常晋义¹

(1. 常熟理工学院 计算机科学与工程学院, 江苏 常熟 215500; 2. 厦门大学 信息科学与技术学院, 福建 厦门 361005)

摘 要: 提出一种适用于认知网络的认知差错控制策略(CEC), 该策略根据认知数据帧被转发所经历的跳数和类型的重要性智能地为丢失数据帧选择最佳差错控制机制来改善认知网络的通信性能。建立了认知网络能效模型, 数学分析和仿真比较表明: 该策略能够有效地提高认知网络多媒体数据传输的可靠性, 同时保持高能效。

关键词: 认知网络; 差错控制; 误帧率; 性能评价

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2011)11-0011-10

Frame importance valuation cognition based error control mechanism on cognitive networks

LE De-guang¹, JIN Yong¹, GUO Dong-hui², CHANG Jin-yi¹

(1. Scholl of Computer Science & Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China;

2. School of Information Science & Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: A cognitive error control mechanism for cognitive networks, called CEC was proposed. CEC was based on the cognition of importance of data frames' hops and types, which could select a best error control mechanism to improve the communication performance in cognitive networks. Besides, the energy efficiency model of cognitive networks was built. The mathematical analysis and simulation comparisons show that the proposed CEC mechanism achieves better performance in terms of communication reliability and energy efficiency in cognitive networks.

Key words: cognitive network; error control; frame error rate; performance evaluation

1 引言

认知网络是一个智能的通信系统^[1], 它能够观察、感知和学习现有的网络环境, 通过对所处环境的理解, 包括链路层面的策略控制与物理层面的信道状态, 智能决策并实时调整通信网络和节点的配置与行为(如交换、路由和资源分配等), 进而达到对网络性能的智能优化。同时, 它还具备从变化中学习的能力, 且能把它用到未来的决策中。

目前, 对于认知网络的研究重点集中在介质访问控制^[2]、路由技术^[3]和 QoS 等方面^[4]。上述研究都是针对通用的认知网络或其某一关键技术而展开, 并没有看到关于认知网络差错控制的研究。在认知网络中, 无线链路存在严重的数据丢失现象, 这主要是由于收发节点之间及其对通信信道缺乏认知等引起的^[5], 例如收发节点互不确定对方的信道状态, 发送节点可能在接收节点不可用的信道上进行数据发送。其次, 认知信息可能不够准确, 造

收稿日期: 2011-08-30; 修回日期: 2011-11-15

基金项目: 江苏省“六大人才高峰”基金资助项目(09-D-LE-Deguangu); 江苏省高校自然科学基金资助项目(10KJB520001); 常熟理工学院教师科研启动基金资助项目(KY2009024); 常熟理工学院青年教师科研启动基金资助项目(QZ0911)

Foundation Items: The Program for Advanced Talents Within Six Industries of Jiangsu Province(09-D-LE Deguang); The Natura Science Foundation for Colleges and Universities in Jiangsu Province(10KJB520001); The Teacher Science Foundation of Changshu Institute of Technology(KY2009024); The Young Teacher Science Foundation of Changshu Institute of Technology(QZ0911)

成发送节点对认知指示可用而实际不可用的信道进行数据发送。此外,在数据发送过程中,通信节点动态返回信道干扰正在传输的数据。基于上述原因,发送节点发送的数据无法到达接收节点的可能性较大,造成比较严重的数据丢失现象。另一方面,随着多媒体应用的不断普及,如何提高多媒体数据的实时传输服务也是认知网络需要解决的问题。因此,在面对分组丢失的网络环境和实时多媒体通信的应用场合,研究一种具有高能效和较强鲁棒性的认知差错控制策略,以有效控制由于信道干扰和节点之间缺乏认知导致的传输错误,并保证多媒体数据可靠传输,成为认知网络差错控制研究的重要方向。

现有的差错控制基本可分为 3 类:前向纠错(FEC, forward error correction)^[6],自动请求重传(ARQ, automatic repeat request)^[7]和混合 ARQ (HARQ, hybrid ARQ)^[8]。其中, FEC 在数据被传输之前预先对其按一定的编码格式处理,并连同数据一起发送额外的信息。这样,接收节点能够通过额外的信息来检测和纠正数据。虽然 FEC 能够对传输信道上的数据错误进行纠错而不要求其重传,但是其传输额外的冗余信息却增加了信道负载。在 ARQ 中,接收节点发现接收的数据有错误时,会自动要求发送节点重新发送数据。在发送节点收到重新传输的请求信号后,它会重新发送该数据一直到数据被正确接收或错误持续的时间超过了设定的重新发送次数。ARQ 的缺点是数据的重传和较长的等待时间降低数据传输速度和实时性,因此在高速传输(如多媒体数据通信)时,会显著降低信道的利用率和数据通信性能。为了克服 FEC 和 ARQ 的缺点,将 FEC 和 ARQ 相结合以充分利用 2 种策略各自的优点,称为 HARQ。由于 HARQ 策略是 FEC 和 ARQ 相结合,因此采用不同的 FEC 策略(如 BCH 编码和 RS 编码等)和不同的 ARQ 策略(如停止一等待和选择重传等)结合可以组成多种不同的 HARQ 策略^[9,10]。

随着人们对认知网络研究的日益广泛,对认知网络的差错控制研究也成为近年来的研究热点^[11,13]。在文献[11]中, Jeon 等学者对认知无线网络的信道资源和流量优先级进行了深入研究,并提出了一种基于信道资源和流量优先级的 ARQ 差错控制,以满足认知网络的不同信道资源和流量对差错控制策略的差异性要求。虽然认知网络在低数据传输率信道和低冲突流量下 ARQ 能够显著降低数据传输

的错误率,但是由于 ARQ 重传引起的资源和能量消耗大大降低了数据传输的能效,因此单纯的 ARQ 不能达到最佳的差错控制。为此,在认知网络中需要结合 FEC 策略,通过冗余码减少数据重传次数。另外,当认知节点之间的通信距离超过一定范围后,ARQ 的重传差错控制不但会引起数据传输错误率的显著提高,而且会造成认知节点消耗的能量显著增加,因此认知节点之间的通信距离对通过 ARQ 重传机制来提高数据传输的效率有着重要影响,然而文献[11]并未考虑认知节点通信距离与 ARQ 能效之间的这种影响。在文献[12]中, Tannious 等将 ARQ 和 FEC 相结合,对认知无线协议中的 HARQ 差错控制机制进行了深入研究,提出了一种基于认知节点和基站之间的轻量级非对称性 HARQ 策略用于认知网络。但是在实际的认知网络中,认知网络的数据传输一般需要经历多跳才能够到达目的节点,文献[12]一方面没有深入研究多跳认知网络差错控制策略,另一方面也并未考虑数据帧被转发所经历的认知节点路由跳数对于选择差错控制策略的影响。由于不同的数据帧在认知网络中传输时,它们所经历的认知节点路由跳数不同,所以传输数据帧所消耗的能量差别较大。因此,如果认知节点对所有的数据帧采用同一种差错控制策略,显然是不恰当的。文献[13]中对认知无线网络的 HARQ 机制进行了深入分析,提出了一种端到端的 HARQ 实现自适应差错控制,分析了多链路优于单链路策略的满足性条件。这样,认知节点通过认知相邻节点的情况及它们之间的信道质量,并利用该条件选择最佳的链路数和差错控制策略使网络具有最佳的数据传输性能。文献[13]的实验结果表明随着通信链路密度的增加, HARQ 差错控制的数据传输误帧率不断下降,并具有较好的差错控制性能。然而,文献[13]并未对不同的编码算法(如 BCH 编码和 RS 编码等^[14])的影响进行分析^[15]。

本文首先深入分析和研究分层次的网络体系结构的特点,以及认知网络差错控制协议认知机制。在此基础上提出一种认知差错控制(CEC, cognitive error control)策略,以提高认知网络的数据传输可靠性和能效等通信性能。此外,通过数学模型分析了基于数据帧跳数和类型重要性的认知差错控制策略的能效和数据传输可靠性(即误帧率)。本文工作的主要贡献首先在于通过数学模型认知数据帧所经历的跳数对于网络能耗的影响,表明经

历跳数越多的数据帧具有更高的重要性，并为经历跳数越多的丢失数据帧选择可靠性越高的差错控制策略；其次，通过 MPEG-4 算法认知多媒体数据不同帧类型在编解码中具有不同的重要性，并对差错控制策略的选择产生影响，表明对于不同类型的数据帧应选择不同的差错控制策略；最后，根据数据帧跳数和类型重要性提出了一种认知差错控制策略，并建立数学分析模型。此外，通过数学分析和仿真比较证明了 CEC 策略在认知网络中具有高效率和高可靠性的特点。

本文其余章节安排如下：第 2 节首先认知数据帧跳数和类型在认知网络差错控制中的重要性，在此基础上提出一种基于帧重要性的 CEC 认知差错控制策略，并提出了 CEC 的跨层设计结构及其实现；第 3 节建立信道和能效模型；然后建立了 ARQ、FEC 和 HARQ 能效和可靠性数学模型，并推导出 CEC 的能效和可靠性数学模型；在第 4 节中，通过数学模型仿真比较了 CEC 的能效和通信可靠性，并对该策略进行性能分析和评价；最后总结全文，并提出未来工作的一些设想。

2 认知网络链路层差错控制策略

本节首先根据网络层数据帧被转发所经历的跳数建立认知网络能耗模型，分析得到数据帧被转发的跳数重要性认知原则，并给出了在多媒体通信中数据帧类型的不同重要性特性及其认知原则，然后提出了一种基于网络层跳数和应用层数据类型重要性认知的差错控制策略，并给出其跨层设计与实现。

2.1 数据帧跳数重要性认知

在认知网络中，每一个数据帧被转发所经历的跳数与传输该数据帧所消耗的能量有直接的关系，图 1 给出了一种采用多跳方式组织的平面型认知网络拓扑结构^[16]。图 1 中的节点称为认知节点(CN, cognitive node)。在认知节点中，当数据分组不进行分片时，根据 RFC 4944^[17]，其最大的长度为 1 280byte。这时，一个网络层的 IP 数据分组可以被封装到一个链路层的数据帧中。因此，数据分组所经历的跳数等于认知节点转发该数据帧所经历的跳数。在这种情况下，分组丢失率 P 就等于丢帧率 P_f 。

在图 1 中，认知源节点(S)向认知目的节点(D)发送一个数据帧记为 LLF，数据帧 LLF 需要在认知网络中经历多个认知节点(如 CN_1, CN_2, \dots, CN_N)的

转发。从认知节点 CN_1 到认知节点 CN_x 传输数据帧 LLF 所需的能耗如式(1)所示。

$$E_{total}(LLF(x)) = \sum_{p=1}^{x-1} E_{hop_p}, \quad 2 \leq x \leq N \quad (1)$$

在式(1)中， E_{hop_p} 表示从认知节点 CN_p 到认知节点 CN_{p+1} 传输数据帧 LLF 所需的能耗。

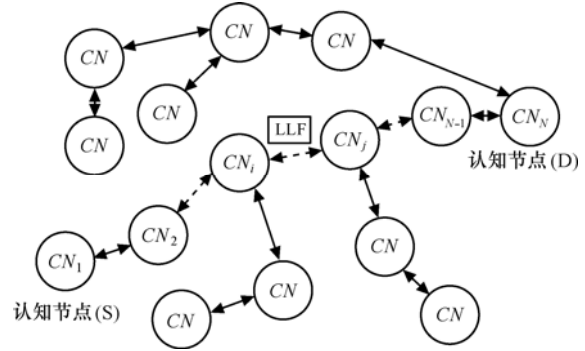


图 1 认知网络拓扑结构

如果数据帧 LLF 在认知节点 CN_i 之后丢失，该丢失的数据帧记为 $LLF(i)$ 。根据式(1)得出，从认知节点 CN_1 到认知节点 CN_i 重新传输数据帧 $LLF(i)$ 需要消耗的能量如式(2)所示。

$$E_{total}(LLF(i)) = \sum_{p=1}^{i-1} E_{hop_p} \quad (2)$$

在式(2)中， $i-1$ 表示数据帧 $LLF(i)$ 在节点 CN_i 丢失时，该数据帧被转发所经历的跳数。

同理，如果 LLF 在认知节点 CN_j 后丢失，根据式(1)得出，从认知节点 CN_1 到认知节点 CN_j 重新传输丢失的数据帧 $LLF(j)$ 需要消耗的能量如式(3)所示。

$$E_{total}(LLF(j)) = \sum_{p=1}^{j-1} E_{hop_p} \quad (3)$$

在式(3)中， $j-1$ 表示数据帧 $LLF(j)$ 在认知节点 CN_j 丢失时，该数据帧被转发所经历的跳数。

假设 $j > i$ ，则根据式(2)和式(3)，可以得到式(4)。

$$E_{total}(LLF(j)) - E_{total}(LLF(i)) = \sum_{p=i}^{j-i} E_{hop_p} + \sum_{p=1}^{i-1} E_{hop_p} - \sum_{p=1}^{i-1} E_{hop_p} = \sum_{p=i}^{j-i} E_{hop_p} > 0 \quad (4)$$

从式(4)中可以看出，传输数据帧 $LLF(j)$ 所需的能耗大于传输数据帧 $LLF(i)$ 所需的能耗，表明在认知网络中，数据帧被认知节点转发所经历的跳数越多，该数据帧则越重要。因此，为了避免过多的网络资源和认知节点能量的浪费，如果数据帧 $LLF(i)$

和 $LLF(j)$ 丢失, 则应为 $LLF(j)$ 选择一种更高可靠性的差错控制策略以保证该数据帧能够正确到达目的节点。为此, 提出跳数重要性认知原则, 即认知节点根据被转发数据帧所经历的不同跳数选择不同的差错控制策略。

2.2 数据帧类型重要性认知

网络通信技术的迅猛发展激发了越来越多的网络业务, 特别是高带宽的多媒体视频业务。而网络带宽作为网络通信中最宝贵的资源, 其增长速度已经难以满足目前及将来的多媒体业务需求。为了提高网络带宽的利用率, 多媒体数据通常需要进行压缩处理传输。目前常用的多媒体数据压缩算法有 JPEG-x, H.26x 和 MPEG-x 等。其中, MPEG-4 算法不但能有效地节省网络带宽资源而且能够显著提高多媒体服务质量^[18]。因此, 在本文中主要研究对 MPEG-4 压缩算法中的数据帧重要性认知^[19]。

在 MPEG-4 算法中, 有 2 种数据帧类型, 它们分别是帧内编码图像帧(intra-coded frame)即 I 帧, 预测编码图像帧(predictive-coded frame)即 P 帧和双向预测编码图像帧(bidirectionally predictive-coded frame)即 B 帧。其中, I 帧是通过帧内编码生成, 其解码独立进行, 因此该帧也是最重要。P 帧是通过一个过去的 I 帧或 P 帧采用有运动补偿的帧间预测进行编码产生, 它的解码取决于该帧之前的一个数据帧, 因此它的重要性不如 I 帧。B 帧不但通过过去的图像帧(I 帧或 P 帧), 也需要后来的图像帧(P 帧)进行有运动补偿的双向预测编码生产, 它的解码同时取决于该帧之前和之后的 2 个数据帧, 因此它最不重要^[20]。式(5)给出了 MPEG-4 中, I 帧、P 帧和 B 帧之间的重要性比较。

$$FIV_{I-frame} > FIV_{P-frame} > FIV_{B-frame} \quad (5)$$

在认知网络中, 不同类型的 MPEG-4 视频帧将被封装到链路层数据帧中, 因此应该通过认知不同数据帧类型的重要性, 对其在传输中出现的差错采用不同的差错控制机制, 以有效提高数据帧的传输性能, 这就是数据帧类型重要性认知原则。

2.3 基于帧重要性认知的差错控制

根据 2.1 节和 2.2 节对数据帧跳数及类型重要性认知的研究, 定义了用于认知帧重要性(FIV)的 2 个度量指标, 它们分别是帧跳数(hop_count)和帧类型($video_frame_type$)。其中, hop_count 是

指认知节点对接收到的数据帧已经通过认知网络的路由跳数值。 $video_frame_type$ 是指认知源节点发送数据时, 不同类型的数据帧所对应的重要性值。由于帧跳数和帧类型的认知分别来自网络层和应用层, 它们彼此独立。为此, 假定它们对链路层差错控制的重要性一样, 即两者具有相同权重。因此, 通过式(6)认识数据帧的重要性。

$$FIV = hop_count + video_frame_type \quad (6)$$

在认知网络差错控制中, 当认知节点出现一个丢失的数据帧时, 该认知节点将通过其网络层的帧跳数信息和应用层的帧类型信息认识该丢失数据帧的重要性, 并利用式(6)认识的结果调用不同的差错控制机制, 如式(7)所示。

$$CEC = \begin{cases} FEC, FIV(LOST_LLF) \in (0, \theta_1] \\ ARQ, FIV(LOST_LLF) \in (\theta_1, \theta_2] \\ HARQ, FIV(LOST_LLF) > \theta_2 \end{cases} \quad (7)$$

在式(7)中, θ_1 和 θ_2 为阈值, 它们表示根据丢失数据帧的重要性来选择差错控制机制的极值。当丢失的数据帧的 $FIV(LOST_LLF)$ 值在 $(0, \theta_1]$ 之间时, 则认知节点采用 FEC 机制对该丢失数据帧进行差错控制; 当丢失的数据帧的 $FIV(LOST_LLF)$ 值属于区间 $(\theta_1, \theta_2]$, 则认知节点将采用 ARQ 机制对该丢失数据帧进行差错控制。当丢失的数据帧的 $FIV(LOST_LLF)$ 值大于 θ_2 , 则认知节点将采用 HARQ 机制对该丢失数据帧进行差错控制。

2.4 认知差错控制的跨层设计与实现

针对 2.3 节提出的 CEC 认知差错控制策略, 本节将在认知节点中设计和实现该策略。图 2 给出了认知网络中一个认知源节点的 CEC 跨层设计体系结构。

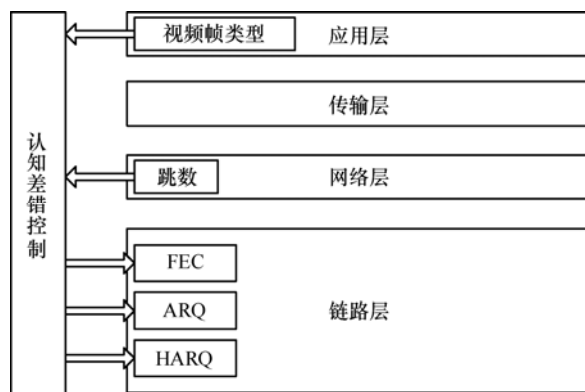


图 2 CEC 跨层设计体系结构

从图 2 可以看到，在链路层中包含了 3 种差错控制模块，即 FEC、ARQ 和 HARQ。网络层的跳数模块用于认知数据帧经历的路由跳数，应用层的视频帧类型模块用于认知发送当前数据帧类型的重要性。另外，本文设计了认知差错控制模块贯穿应用层、网络层和数据链路层，它根据丢失数据帧的重要性认识在链路层中为每一个丢失数据帧智能地选择一种最佳的差错控制机制。根据图 2 的认知差错控制跨层设计，图 3 给出了 CEC 算法实现伪码。

```

Process of CEC () {
  while (Lost_LLF) {
     $\theta_1 = threshold_1$ ;
     $\theta_2 = threshold_2$ ;
     $FIV(Lost\_LLF) =$ 
       $hop\_count(Lost\_LLF) + video\_frame\_type(Lost\_LLF)$ ;
    if ( $FIV(Lost\_LLF) > \theta_2$ ) {
      call HARQ;
    } else {
      if ( $FIV(Lost\_LLF) > \theta_1$ ) {
        call ARQ;
      } else {
        call FEC;
      }
    }
  }
}
    
```

图 3 CEC 算法伪码

在图 3 中，Lost_LLF 表示丢失的数据帧。hop_count (Lost_LLF)表示丢失的数据帧 Lost_LLF 所经历的跳数。video_frame_type(Lost_LLF)表示丢失的数据帧类型的重要性。设置了 2 个阈值 $\theta_1=threshold_1$ 和 $\theta_2=threshold_2$, 其中 $threshold_1 < threshold_2$ 。如果 $FIV(Lost_LLF)$ 的值大于 $threshold_2$, 则选择 HARQ 策略。如果 $FIV(Lost_LLF)$ 的值小于 $threshold_1$, 则为该数据帧选择 FEC 策略; 如果 $FIV(Lost_LLF)$ 的值属于区间 ($threshold_1, threshold_2$], 则选择 ARQ 策略。

图 4 给出了 CEC 差错控制在一种树型的认知网络拓扑中运行的一个实例。其中，video_frame_type 的值取 3, 2, 1, 它们分别表示 I 帧、P 帧和 B 帧的重要性。此外， θ_1 和 θ_2 分别取 2 和 3。

从图 4 可以看出，认知节点 A 发送一系列 P 帧，如果该 P 帧在从认知节点 A 发往认知节点 B 的过程中出现丢失，根据式(6)和式(7)，FIV 的值为 3，它属于(2, 3]，因此认知节点 A 对该丢失 P 帧将采用 ARQ 差错控制策略。对于认知节点 F 发送一系列 B 帧的情况，当该 B 帧在从节点 F 到 E 的过程中出现丢失，根据式(6)和式(7)，FIV 的值为 2，它属于(0, 2]，因此认知节点 F 对该丢失 B 帧将采用

FEC 进行差错控制。类似地，对于在从认知节点 E 到 C 的链路上出现丢失的数据帧，由于其 FIV 值大于 3，因此 CEC 将采用 HARQ 进行差错控制。

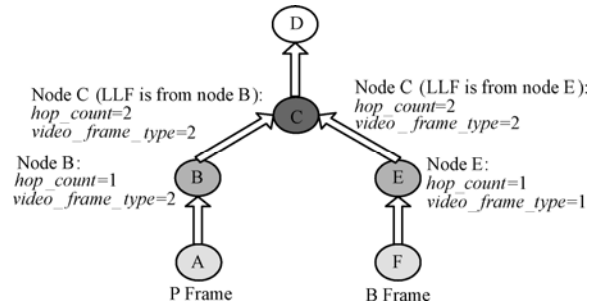


图 4 CEC 算法在认知网络中一个实例

3 数学分析模型

本节首先给出认知网络中的信道和能效模型，然后对认知网络中的差错控制机制 ARQ, FEC、HARQ 和 CEC 的能效和可靠性进行分析，并给出数学分析模型。

3.1 信道和能效模型

无线信号传播理论模型主要有自由空间传播 (free space propagation)模型、对数距离路径损耗 (log-distance path loss)模型和对数—常态分布 (log-normal distribution)模型等^[21], 其中对数距离路径损耗模型的使用最为广泛。在对数距离路径损耗模型中，当发送节点和接收节点之间的距离为 d 时，接收节点的接收功率如式(8)所示。

$$P_r(d) = P_t - P(d_0) - 10\beta \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (8)$$

在式(8)中， β 为路径损耗参数，它表示路径损耗随着距离增长的速率。 β 随着周围环境和建筑物类型的不同而改变，表 1 列出了不同环境中所使用的不同 β 值。

表 1	不同环境中的 β 参数值	
	环境	β 值
	畅通空间	2
	城市空间	2.7~3.5
	具有遮蔽效应的城市空间	3~5
	建筑物内可视区域	1.6~1.8
	建筑物内有障碍物区域	4~6

在本文中，取 β 值为 3。 d_0 表示接近发送节点的近地参考距离，在本文中取 d_0 值为 1km。因此，

接收节点的信噪比 γ_{dB} 如式(9)所示。

$$\gamma_{dB} = P_r(d) - P_n \quad (9)$$

其中, p_n 表示噪声功率。

另外, 同时考虑认知网络系统的能耗和通信可靠性, 可以得出数据传输能效模型, 如式(10)所示。

$$\eta = \eta_e r = \frac{E_{effi}}{E_{total}}(1 - P_{FER}) \quad (10)$$

在式(10)中, η 表示认知网络系统的能效。 η_e 表示认知网络的能耗吞吐量, 用来度量认知网络系统的能耗。 $\eta_e = E_{effi} / E_{total}$, 即等于数据帧中负载的能耗 E_{effi} 与总能耗 E_{total} 之间的比值。 r 表示数据帧被认知节点正确接收的概率, 用它来度量认知网络系统的通信可靠性。 $r = 1 - P_{FER}$, 其中, P_{FER} 表示数据帧在认知节点之间传输时出错的概率, 即误帧率。

3.2 ARQ 能效和可靠性分析模型

文献[11]指出 ARQ 适用于具有低传输率和低冲突数据流量的认知网络中, 即认知节点发送密度小、发送的数据帧数量少。因此, 选择停止一等待 ARQ 协议分析其能效和可靠性。ARQ 的能耗可以用式(11)表示。

$$E_N^{ARQ} = E^{ARQ}(1 + P_{ARQ} + P_{ARQ}^2 + \dots + P_{ARQ}^N) \quad (11)$$

其中, N 表示 ARQ 差错控制中数据帧重传的次数。 E_N^{ARQ} 表示 ARQ 重传 N 次数据帧时的总能耗, E^{ARQ} 表示 ARQ 的重传次数为 0 时的能耗, 它可以用式(12)表示。

$$E^{ARQ} = E_{tran}^{ARQ} + E_{re}^{ARQ} \quad (12)$$

其中, E_{tran}^{ARQ} 表示认知节点发送数据帧所需的能耗, E_{re}^{ARQ} 表示认知节点接收数据帧所需的能耗。 E_{tran}^{ARQ} 和 E_{re}^{ARQ} 分别用式(13)和式(14)表示。

$$\begin{aligned} E_{tran}^{ARQ} &= E_{tran}^{DATA} + E_{re}^{ACK} \\ &= I_{tr} V_{radio} l_{DATA} T_{tr} + I_{re} V_{radio} l_{ACK} T_{tr} \\ &= V_{radio} T_{tr} (I_{tr} l_{DATA} + I_{re} l_{ACK}) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} E_{re}^{ARQ} &= E_{re}^{DATA} + E_{tran}^{ACK} \\ &= I_{re} V_{radio} l_{DATA} T_{tr} + I_{tr} V_{radio} l_{ACK} T_{tr} \\ &= V_{radio} T_{tr} (I_{re} l_{DATA} + I_{tr} l_{ACK}) \end{aligned} \quad (14)$$

在式(13)和(14)中, V_{radio} 、 I_{tr} 、 I_{re} 分别表示认知节点射频模块的电压、发射电流和接收电流。 T_{tr} 表示认知节点传输 1bit 信息所用时间, 它等于 $1/R_{radio}$, 其中, R_{radio} 表示认知节点发送数据的速率。

此外, 认知节点使用非相干 FSK 解调, 式(15)给出其误码率。

$$P_b = \frac{1}{2} e^{-\frac{E_b}{2N_0}}, \quad \frac{E_b}{N_0} = \gamma \frac{B_N}{R_{radio}} \quad (15)$$

其中, γ 表示接收认知节点的信噪比, B_N 表示噪声带宽, R_{radio} 表示认知节点发送数据的速率。

根据式(15)的误码率 P_b , 可以得到 ARQ 的误帧率 P_{ARQ} , 如式(16)所示。

$$P_{ARQ} = 1 - (1 - P_b)^{l_{DATA} + l_{ACK}} \quad (16)$$

其中, l_{DATA} 表示数据帧的长度。在链路层中, l_{DATA} 由帧头、帧尾和负载组成, 即 $l_{DATA} = a + l_{payload}$ 。其中, a 表示帧头和帧尾校验位的长度之和, $l_{payload}$ 表示负载的长度, l_{ACK} 是数据确认帧(ACK)的长度。

根据式(16)得出在 ARQ 中, 数据帧正确接收的概率 r_N^{ARQ} 如式(17)所示。

$$r_N^{ARQ} = (1 - P_{ARQ}) + P_{ARQ}(1 - P_{ARQ}) + \dots + P_{ARQ}^N(1 - P_{ARQ}) \quad (17)$$

根据式(10)及式(11)~式(17), 可以推导出 ARQ 的能效如式(18)所示。

$$\begin{aligned} \eta_N^{ARQ} &= \frac{E_{effi}^{ARQ}}{E_N^{ARQ}} r_N^{ARQ} \\ &= E_{effi}^{ARQ} \frac{(1 - P_{ARQ}) + P_{ARQ}(1 - P_{ARQ}) + \dots + P_{ARQ}^N(1 - P_{ARQ})}{E^{ARQ}(1 + P_{ARQ} + P_{ARQ}^2 + \dots + P_{ARQ}^N)} \\ &= \frac{E_{effi}^{ARQ}}{E^{ARQ}} (1 - P_{ARQ}) \\ &= \frac{V_{radio} T_{tr} l_{payload} (I_{tr} + I_{re})}{V_{radio} T_{tr} (l_{DATA} + l_{ACK}) (I_{tr} + I_{re})} (1 - P_{ARQ}) \\ &= \frac{l_{payload}}{l_{DATA} + l_{ACK}} (1 - P_{ARQ}) \end{aligned} \quad (18)$$

其中, E_{effi}^{ARQ} 表示数据帧中负载部分的能耗。从式(18)可以看出, ARQ 的能效与数据帧的重传次数 N 无关, 但与数据帧的长度和通信距离有关。

3.3 FEC 能效和可靠性分析模型

在 FEC 机制中, 认知节点的能耗主要包括认知节点启动能耗、认知节点发送和接收数据帧的能耗以及使用编码算法对数据帧的编解码能耗。因此, 其认知节点的 EFC 总能耗 E^{FEC} 如式(19)所示。

$$E^{FEC} = E_{start} + E_{tran}^{FEC} + E_{re}^{FEC} + E_{enc} + E_{dec} \quad (19)$$

其中, E_{start} 表示认知节点启动所需的能耗, E_{tran}^{FEC} 表示认知节点发送数据帧所需的能耗, E_{re}^{FEC} 表示认知节点接收数据帧所需的能耗, E_{enc} 和 E_{dec} 分别表示编码算法的编解码能耗。

下面以 $RS(n,v)$ 编码算法为例分析其编解码能耗。由于 $RS(n,v)$ 的编码能耗相对于解码能耗而言很小, 因此可以忽略 E_{enc} 。在 $RS(n,v)$ 编码算法中, v 表示原始数据帧的长度, n 表示加入冗余数据后的码字长度。编码器将在数据源加入 τ 冗余数据到原始数据帧中, 因此 $n = v + \tau$ 。在认知网络中, 如果认知节点需要发送的数据帧的长度为 k , 那么根据 $RS(n,v)$ 编码, 需要传输的码字个数如式(20)所示。

$$C_{number} = \left\lceil \frac{k}{v} \right\rceil \quad (20)$$

根据式(20), $RS(n,v)$ 编码算法解码能耗 E_{dec} 如式(21)所示^[22]。

$$E_{dec} = C_{number} ((4nt + 10t^2)E_{mult} + (4nt + 6t^2)E_{add} + 3tE_{inv}) \quad (21)$$

在式(21)中, E_{mult} 、 E_{add} 和 E_{inv} 分别表示 $GF(2^m)$ 域内元素进行乘法、加法和求倒数运算所需要的能耗。其中, m 的取值为 $\lfloor \ln v + 1 \rfloor$, t 的取值为 $(n - v) / 2$ 。

根据式(10)和式(19)~式(21)可以推导出 FEC 能效如式(22)所示。

$$\begin{aligned} \eta^{FEC} &= \frac{E_{eff}^{FEC}}{E^{FEC}} (1 - P_{FEC}) \\ &= \frac{V_{radio} T_{tr} (k - a)(I_{tr} + I_{re})}{E_{start} + V_{radio} T_{tr} (k + C_{number} \tau)(I_{tr} + I_{re}) + E_{dec}} (1 - P_{FEC}) \end{aligned} \quad (22)$$

其中, E_{eff}^{FEC} 表示采用 FEC 机制发送负载长度为 $k - a$ 时的能耗, 根据式(13)和式(14)得出其值为 $V_{radio} T_{tr} (k - a)(I_{tr} + I_{re})$, k 表示数据帧的长度, a 表示帧头和帧尾校验位的长度之和。另外, 采用 FEC 时的误帧率 P_{FEC} 如式(23)所示。

$$P_{FEC} = 1 - \left(\sum_{i=0}^l \binom{n}{i} (1 - p_b)^{n-i} p_b^i \right)^{C_{number}} \quad (23)$$

3.4 HARQ 能效和可靠性分析模型

在 HARQ 中, 当接收认知节点检测到接收的数据帧错误时, 它首先会通过信道编码算法进行纠错。如果信道编码的纠错能力无发纠正数据帧的错误, HARQ 将会要求发送认知节点重新发送该数据帧。

当 HARQ 的重传次数为 0 时, 其总能耗 E_0^{HARQ} 如式(24)所示。

$$\begin{aligned} E_0^{HARQ} &= E_{start} + E_{tran}^{HARQ} + E_{re}^{HARQ} + E_{dec} \\ &= E_{start} + V_{radio} T_{tr} (n + l_{ACK})(I_{tr} + I_{re}) + E_{dec} \end{aligned} \quad (24)$$

当 HARQ 进行第 k ($k \geq 1$) 次重传时, 其能耗 E_k^{HARQ} 如式(25)所示。

$$\begin{aligned} E_k^{HARQ} &= E_{start} + E_{tran}^{HARQ} + E_{re}^{HARQ} + E_{dec} + E_k^{MRC} \\ &= E_{start} + V_{radio} T_{tr} (n + l_{ACK})(I_{tr} + I_{re}) + E_{dec} + E_k^{MRC} \end{aligned} \quad (25)$$

其中, E_k^{MRC} 表示为第 k 次重传后进行最大比合并的能耗, 它可由式(26)表示。

$$E_k^{MRC} = I_{proc} V_{proc} (n + l_{ACK}) [kT_{add} + (k + 1)T_{mult}] \quad (26)$$

其中, T_{mult} 和 T_{add} 分别表示认知节点进行一次乘法和加法运算操作所需的时间。

当 HARQ 最大重传次数为 N_{max} 时, N_{max} 次重传的 HARQ 总能耗如式(27)所示。

$$E_{total, N_{max}}^{HARQ} = E_0^{HARQ} + E_1^{HARQ} P_0^{HARQ} \dots + E_{N_{max}}^{HARQ} \sum_{k'=0}^{N_{max}-1} P_{k'}^{HARQ} \quad (27)$$

其中, P_0^{HARQ} 表示数据帧第一次传输时的误帧率, P_k^{HARQ} ($k \geq 1$) 表示 HARQ 在第 k 次重传时的误帧率。因此, HARQ 的误帧率 P_{HARQ} 如式(28)所示。

$$\begin{aligned} P_{HARQ} &= P_0^{HARQ} - (1 - P_1^{HARQ}) P_0^{HARQ} - \dots - \\ &\quad (1 - P_{N_{max}}^{HARQ}) \sum_{k'=0}^{N_{max}-1} P_{k'}^{HARQ} \end{aligned} \quad (28)$$

HARQ 的数据帧正确接收概率 r_N^{HARQ} 如式(29)所示。

$$\begin{aligned} r_{N_{max}}^{HARQ} &= (1 - P_0^{HARQ}) + (1 - P_1^{HARQ}) P_0^{HARQ} + \dots + \\ &\quad (1 - P_{N_{max}}^{HARQ}) \sum_{k'=0}^{N_{max}-1} P_{k'}^{HARQ} \end{aligned} \quad (29)$$

因此, 根据式(10)和式(24)~式(29), 可以推导出 HARQ 的能效可以如式(30)所示。

$$\begin{aligned} \eta_{N_{\max}}^{HARQ} &= \frac{E_{\text{effi}}^{HARQ}}{E_{\text{total}, N_{\max}}^{HARQ}} r_{N_{\max}}^{HARQ} = E_{\text{effi}}^{HARQ} \frac{(1 - P_0^{HARQ}) + (1 - P_1^{HARQ})P_0^{HARQ} + \dots + (1 - P_{N_{\max}}^{HARQ}) \prod_{k'=0}^{N_{\max}-1} P_{k'}^{HARQ}}{E_0^{HARQ} + E_1^{HARQ}P_0^{HARQ} \dots + E_{N_{\max}}^{HARQ} \prod_{k'=0}^{N_{\max}-1} P_{k'}^{HARQ}} \\ &= V_{\text{radio}} T_{\text{tr}} l_{\text{payload}} (I_{\text{tr}} + I_{\text{re}}) \frac{(1 - P_0^{HARQ}) + (1 - P_1^{HARQ})P_0^{HARQ} + \dots + (1 - P_{N_{\max}}^{HARQ}) \prod_{k'=0}^{N_{\max}-1} P_{k'}^{HARQ}}{E_0^{HARQ} + E_1^{HARQ}P_0^{HARQ} \dots + E_{N_{\max}}^{HARQ} \prod_{k'=0}^{N_{\max}-1} P_{k'}^{HARQ}} \end{aligned} \quad (30)$$

其中, E_{effi}^{HARQ} 表示采用 HARQ 机制发送负载长度为 l_{payload} 的有效能耗, 根据式(13)和式(14)得出其值为 $V_{\text{radio}} T_{\text{tr}} l_{\text{payload}} (I_{\text{tr}} + I_{\text{re}})$ 。

3.5 CEC 能效和可靠性分析模型

根据第 2 节的 CEC 算法, CEC 的能效与 ARQ、FEC 和 HARQ 关联。基于上文对 ARQ、FEC 和 HARQ 的能效分析, CEC 的能效可以用式(31)表示。

$$\begin{aligned} \eta_{CEC} &= \left(m \sum_{i=1}^x \eta_{FEC} + n \sum_{j=1}^y \eta_{ARQ} + p \sum_{k=1}^z \eta_{HARQ} \right) / \\ &\quad (x + y + z) \\ m &= \begin{cases} 1, FIV(LOST_LLF) \in (0, \theta_1] \\ 0, FIV(LOST_LLF) \notin (0, \theta_1] \end{cases} \\ n &= \begin{cases} 1, FIV(LOST_LLF) \in (\theta_1, \theta_2] \\ 0, FIV(LOST_LLF) \notin (\theta_1, \theta_2] \end{cases} \\ p &= \begin{cases} 1, FIV(LOST_LLF) > \theta_2 \\ 0, FIV(LOST_LLF) \leq \theta_2 \end{cases} \end{aligned} \quad (31)$$

其中, η^{CEC} 表示 CEC 差错控制的能效。x、y 和 z 分别表示采用 FEC、ARQ 和 HARQ 进行差错控制时, 丢失帧的数量。

最后, 根据式(16)、式(23)和式(28), 可以得出 CEC 的误帧率 P_{CEC} 如式(32)所示。

$$P_{CEC} = 1 - (1 - P_{FEC})(1 - P_{ARQ})(1 - P_{HARQ}) \quad (32)$$

4 性能分析与评价

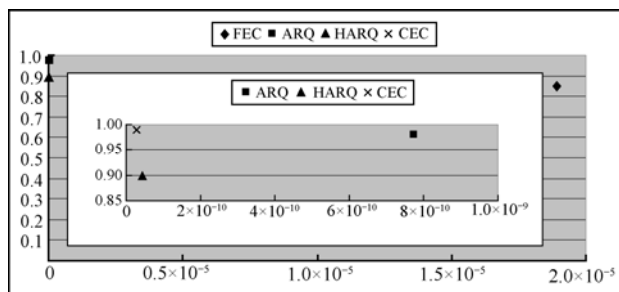
本节将根据第 3 节的数学模型对 FEC、ARQ、HARQ 和 CEC 的能效和误帧率进行仿真分析与比较。在本文的 CEC 数学模型中, θ_1 和 θ_2 的值分别取 2 和 3。在 ARQ、HARQ 和 CEC 中, 错误数据帧的最大重传次数 N_{\max} 的取值为 1。另外, FEC 采用 $RS(n, v)$ 编码器, 其中, n 和 v 的取值分别为 255 和 223。仿真的认知网络拓扑见图 4。在图 4 中, 认知节点的仿真参数是基于 Crossbow 公司的 Mica2 型

节点^[23], 该节点采用了 CC1000 射频模块^[24]和 ATmega128L 处理器^[25], 它们的具体参数及其值见表 2。

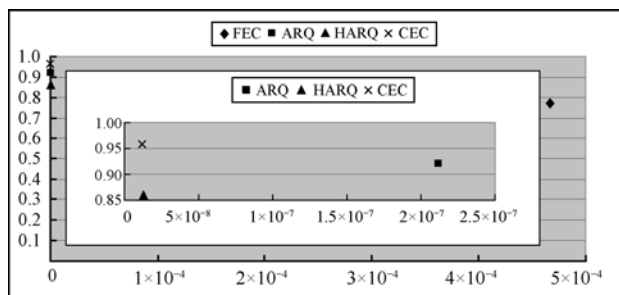
表 2 认知节点参数设置

符号	参数名称	参数值
V_{radio}	CC1000 模块电压	3V
I_{re}	CC1000 模块接收端电流	7mA
I_{tr}	CC1000 模块发射端电流	8.5mA
I_{proc}	ATmega128L 电流	8mA
V_{proc}	ATmega128L 电压	5V
t_{cycle}	ATmega128L 运算周期	250ns
T_{mult}	ATmega128L 一次乘法运算的时间	$t_{\text{cycle}} / 4$
T_{add}	ATmega128L 一次加法运算的时间	$t_{\text{cycle}} / 8$
p_t	发射功率	0dBm
$P(d0)$	参考点的功率损耗	55dB
p_n	噪声功率	-105dBm
a	帧头和帧尾长度之和	11byte
l_{ACK}	确认(ACK)帧的长度	7 byte
B_N	噪声带宽	30kHz
R_{radio}	发射数据速率	38.4kbaud
E_{start}	认知节点启动能耗	2.5nj/frame
E_{mult}	GF(2 ^m)域内元素的乘法运算能耗	$3.7 \times 10^{-5} \text{m}^3 (\text{mW}/\text{MHz})$
E_{add}	GF(2 ^m)域内元素的加法运算能耗	$3.3 \times 10^{-5} \text{m}^3 (\text{mW}/\text{MHz})$
E_{inv}	GF(2 ^m)域内元素的求倒数运算能耗	$3.3 \times 10^{-5} (2\text{m}^{-3}) \text{m}^3 (\text{mW}/\text{MHz})$

在图 4 中, 假设认知节点 A 和 F 随机发送 10 000 个 I 帧、P 帧和 B 帧数据, 并产生 100 个丢失数据帧。下面, 分析和比较对丢失数据帧分别采用 FEC、ARQ、HARQ 和 CEC 差错控制时的能效和可靠性。根据式(16)、式(18)、式(22)、式(23)、式(28)和式(30)~式(32)可以得到如图 5 结果。



(a) 帧长度为 500byte, 通信距离为 50m



(b) 帧长度为 1 000byte, 通信距离为 100m

图 5 ARQ、FEC、HARQ 和 CEC 能效与误帧率比较

图 5 比较了在相同通信距离和数据帧长度的情况下, FEC、ARQ、HARQ 和 CEC 可靠性和能效。在图 5 中, X 轴表示误帧率, Y 轴表示能效。从图 5(a)可以看出, 当发送节点和接收节点之间的通信距离为 50m, 且数据帧的长度为 500byte 时, FEC 的误帧率和能效分别是 1.89×10^{-5} 和 0.85; ARQ 的误帧率和能效分别是 7.76×10^{-10} 和 0.98; HARQ 的误帧率和能效分别是 2.4×10^{-11} 和 0.90; CEC 的误帧率和能效分别是 1.7×10^{-11} 和 0.99。该比较结果表明, 本文的 CEC 与 FEC、ARQ 和 HARQ 相比, 不但具有最低的误帧率, 而且具有最大的能效, 因此能提供最佳的差错控制性能。

当发送节点和接收节点之间的通信距离为 100m, 且数据帧长为 1 000byte 时(如图 5(b)所示), 可以看到 FEC、ARQ、HARQ 和 CEC 4 种差错控制策略的误帧率分别是 4.67×10^{-4} 、 2.12×10^{-7} 、 1.72×10^{-8} 和 1.56×10^{-8} , 它们对应的能效分别是 0.77、0.92、0.86 和 0.96。该比较结果表明, 虽然 CEC 的误帧率随着通信距离的增大和数据帧长度的增大而逐渐增大, 且能效也在逐渐降低, 但是与 FEC、ARQ 和 HARQ 相比, CEC 的误帧率增大和能效下降是最慢的。这是由于 CEC 能够认知数据帧的重要性, 并为丢失的数据帧选择最佳的差错控制机制以实现数据的有效传输。因此, 本文的 CEC 差错控制是整体最优的策略。

5 结束语

面对无线传输中存在的帧丢失问题, 如何为认知网络的多媒体应用提供高可靠性保证的数据通信仍面临的严峻挑战, 为此本文重点研究了认知网络中的差错控制策略。分析了数据帧所经历的跳数和数据帧类型 2 个方面的特性, 证明它们在差错控制中的重要性。再此基础上, 提出了一种基于帧重要性认知的差错控制(CEC)算法。利用该算法, 认知网络中的节点通过认知每一个丢失的数据帧的重要性, 并为它们选择最佳的差错控制策略。数学分析和仿真结果证明本文的 CEC 在认知网络中具有最佳的差错控制。在今后的工作中, 为了更好地适应动态变化的认知网络, 将根据不同的网络状态动态的设置数据帧重要性的 2 个阈值 θ_1 和 θ_2 。此外, 还将进一步研究认知节点的通信距离对 CEC 差错控制影响的优化和改进, 并通过测距技术(如 RSSI)加强通信距离认知和提高差错控制的可靠性。

参考文献:

- [1] THOMAS R W, DASILVA L A, MACKENZIE A B. Cognitive networks[A]. Proceedings of First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN'05)[C]. 2006. 352-360.
- [2] 张立, 郑国莘, 贾东立等. 认知无线网络中控制信道预约的 MAC 协议[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(4):79-82, 92. ZHANG L, ZHENG G X, JIA D L, *et al.* A control channel reserving based MAC protocol for cognitive radio networks[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010, 33 (4): 79-82, 92.
- [3] 滑楠, 曹志刚. 认知无线网络路由研究综述[J]. 电子学报, 2010,38(4): 910-918. HUA N, CAO Z G. Routing of cognitive radio networks: a survey[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 910-918.
- [4] 冯光升,王慧强,马春光等. 面向认知网络的用户 QoS 动态自配置方法[J]. 通信学报, 2010, 31 (3):133-140. FENG G S, WANG H Q, MA C G, *et al.* Dynamic self-configuration of user QoS oriented to cognitive network[J]. Journal on Communications, 2010, 31 (3):133-140.
- [5] HAN C, WANG J, YANG Y L, *et al.* Addressing the control channel design problem: OFDM-based transform domain communication system in cognitive radio[J]. Computer Networks, 2008, 52(4): 795-815.
- [6] CHANG F, ONOHARA K, MIZUOCHI T. Forward error correction

- for 100G transport networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(3): S48-S55.
- [7] VAZE R. Throughput-delay-reliability tradeoff with arq in wireless ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(7): 2142-2149.
- [8] LI F. Research on Hybrid ARQ Schemes in Wireless Communications[D]. University of Science and Technology of China. 2006.
- [9] PAI H T, HAN Y S, CHU Y J. New HARQ scheme based on decoding of tail-biting convolutional codes in IEEE 802.16e[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(3): 912-918.
- [10] C. SHEN C, FITZ M P. Hybrid ARQ in multiple-antenna slow fading channels: performance limits and optimal linear dispersion code design[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(9): 5863-5883.
- [11] JEON S Y, CHO D H. An ARQ mechanism considering resource and traffic priorities in cognitive radio systems[J]. IEEE Communications Letters, 2009, 13(7): 504-506.
- [12] TANNIOUS R A, NOSRATINIA A. Cognitive radio protocols based on exploiting hybrid ARQ retransmissions[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(9): 2833-2841.
- [13] AO W C and CHEN K C. End-To-End HARQ in cognitive radio networks[A]. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC2010)[C]. 2010. 1-6.
- [14] KOTULIAKOVA K, POLEC J. Analysis of HARQ schemes using reed-solomon codes[A]. Proceedings of 15th International Conference on Systems, Signals and Image (IWSSIP 2008)[C]. 2008. 323-326.
- [15] HUNTER T, NOSRATINIA A. Diversity through coded cooperation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(2): 283-289.
- [16] 胡罡, 徐明, 刘丽霞等. 无线认知网络中一种团划分的频谱感知算法[J]. 软件学报, 2011, 22 (2):298-312.
- HU G, XU M, LIU L X, *et al.* Spectrum sensing algorithm based on clique partition for wireless cognitive networks[J]. Journal of Software, 2011, 22 (2): 298-312.
- [17] MONTENEGRO G, KUSHALNAGAR N, HUI J, *et al.* Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks[S]. RFC 4944, IETF, September 2007.
- [18] SANKARASUBRAMANIAM Y, AKYILDIZ I F, MCLAUGHLIN S V W. Energy efficiency based packet size optimization in wireless sensor networks[A]. Proceedings of IEEE Internal Workshop on Sensor Network Protocols and Applications, 2003. 1-8.
- [19] CHEN Y, WU Y, WANG B B, *et al.* Spectrum auction games for multimedia streaming over cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(8): 2381-2390.
- [20] KOENEN R. ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 N4668: overview of the MPEG-4 standard[EB/OL].<http://www.chiariglione.org/mpeg/standards/mpeg-4/mpeg-4.htm>, 2011.
- [21] RAPPAPORT S. Wireless Communications: Principles and Practice (2nd Edition)[M]. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2002.
- [22] GOEL M, SHANBHAG N R. Low-power channel coding via dynamic reconfiguration[A]. Proceedings of International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP)[C]. 1999. 1893-1896.
- [23] Crossbow Corp. Mica2 datasheet[EB/OL]. <https://www.eol.ucar.edu>, 2011.
- [24] Chipcon Corp. CC1000 datasheet[EB/OL]. <http://www.ti.com>, 2011.
- [25] Atmel Corp. ATmega128 datasheet[EB/OL]. <http://www.atmel.com>, 2011.

作者简介:



乐德广 (1975-), 男, 福建三明人, 博士, 常熟理工大学教授, 主要研究方向为计算机网络安全与下一代互联网技术等。

靳勇 (1981-), 男, 山西长治人, 硕士, 常熟理工大学讲师, 主要研究方向为无线多媒体网络、无线传感器网络、差错控制等。

郭东辉 (1967-), 男, 福建莆田人, 博士, 厦门大学教授, 主要研究方向为网络体系结构和协议、MANETs、多媒体网络、网络系统性能分析、评价、QoS 等。

常晋义 (1955-), 男, 山西忻州人, 常熟理工大学教授, 主要研究方向为空间决策支持系统、数据库安全技术、软件工程等。