

## Ad hoc中基于主动网的自适应FEC

陈 玉, 王 晟, 李乐民

(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054)

**【摘要】**针对无线信道中高误码率限制传输性能, 固定前向纠错(FEC)又不能适应无线网络中误码率多变和链路差异的环境等问题, 通过利用主动网的网络可编程接口在Ad hoc网络中动态地实现了一种跳到跳的自适应前向纠错策略, 并采用仿真实验进行性能分析, 结果表明能对上述原因造成的丢包起到很好的改善作用。

**关键词** 误码率; Ad hoc 网络; 跳到跳; 自适应前向纠错; 主动网  
中图分类号 TN919.72 文献标识码 A

## Adaptive FEC Based Active Network in Ad hoc Network

CHEN Yu, WANG Sheng, LI Le-min

(School of Communication and Information Engineering, Univ. of Electron. Sci. & Tech. of China Chengdu 610054)

**Abstract** This paper proposes an active network by using adaptive Forward Error Correction (FEC) strategy which is hop-to-hop for improving transmission performance in Ad hoc networks. Fixed FEC can't perform well while wireless link is characterized by high and variable BER (Bit Error Rate). The performance of this strategy is analyzed via simulation experiments by using the Gilbert model as a wireless error model. Finally we demonstrate our method achieves better performance than fixed FEC.

**Key words** bit error rate; Ad hoc network; hop to hop; adaptive forward error correction; active network

无线网络中通常用前向纠错(Forward Error Correction, FEC)降低无线信道中的高误码率(Bit Error Rate, BER)。FEC通过发送冗余信息进行错误恢复, 纠正越高的BER需要越多的冗余信息。对于无线网络中变动较大的BER来说, 采用纠错能力低的编码在遇到高BER时没有显著改善, 采用纠错能力高的编码在低BER情况下又浪费带宽, 更合理的做法是使用动态的FEC来适应BER的变化。

主动网是一种新的可编程分组交换网络, 与传统网络不同的是, 它提供了通用开放的网络可编程接口, 网络节点所具备的处理能力可以动态地扩展、更新和增强, 能对流经的数据进行复杂的计算处理<sup>[1]</sup>, 用户可直接向节点插入定制的程序, 或通过向报文分组中包含可执行的程序代码来配置和扩展网络的核心功能, 通过每跳执行的方式来完成和优化它们的任务, 提供某种定制的网络服务。

主动网的概念为动态FEC改善无线信道性能提供了一种每跳执行配置的新思路。而Ad hoc网络是工作在不固定结构环境下的自组织无线移动网络, 能实现快速自动组网, 节点可移动, 且节点相互之间作为其邻居(在其直接通信范围内的节点)的路由器, 又称为多跳网络或自组织网络<sup>[2]</sup>。在Ad hoc网络的对等式结构的任一节点, 或分级结构的簇头节点<sup>[2]</sup>, 都要求较高的计算能力来处理通信对端交互的信息量。将主动网的思想应用于Ad hoc网络可极大地增强其灵活性与扩展性, 加速网络服务的开发和更新。

### 1 基于传统网络的自适应FEC

传统网络利用自适应FEC来改善无线网络的传输性能, 由于节点计算能力有限, 通常都是基于端到端(End to End)的。普遍的算法是将自动重传请求(Automatic Repeat Request)与FEC相结合, 利用重传请求计算误包率(Packet Error Rate, PER), 以此来调整FEC的编码级别<sup>[3-4]</sup>, 但重传请求意味着丢包不一定是由误码引

收稿日期: 2004 - 07 - 01

基金项目: 信息产业部“十五”预研基金资助项目

作者简介: 陈 玉(1980 -), 女, 硕士, 主要从事主动网技术方面的研究。

起,也可能是拥塞造成。还有定时向发送方发送某时段内误包率<sup>[5]</sup>的策略,也可避免前述缺陷,只是在数据流量很少或没有的时间间隙内,需要定义其他的评估手段。可根据PER和RTT来计算编码码长,使信道吞吐量达到最优的做法<sup>[6]</sup>,将信道误码和信道利用率之间的动态平衡做到真正的量化。

## 2 基于主动网的自适应FEC

利用主动网技术来实现Ad hoc网络的自适应FEC,可使网络具有高度的可扩展性,当新的差错控制技术或性能优化策略出现时,能更加快速主动地更新网络服务;同时 also 具有很强的灵活性,用户可根据实际需要加载或配置协议。基于主动网的自适应FEC实现方式是在Ad hoc网络节点上建立起主动节点的执行环境,增加网络应用编程接口,在现有协议的基础上加载自适应FEC的协议。

自适应FEC协议分为3大功能模块:发送模块、接收模块和编码转换模块。发送模块负责发送、缓存和重传数据包;接收模块主要对收到的数据进行错误检测和恢复,发送重传请求,并将接收窗口中的误包率反馈给前一节点;编码转换模块则依据收到的反馈信息调整当前链路的FEC编码等级。由于Ad hoc网络是无线多跳网络,不同链路之间存在性能差异,因此基于主动网的自适应FEC协议是跳到跳(Hop to Hop)的,不仅在发送方和接收方实现,在传输路径中的任一主动节点都能实现;它也不止针对链路上的某一连接,而是根据整个链路的传输情况做出判断。

### 2.1 自适应FEC协议描述

由于一个节点可能同时面向多条链路的连接,所以在节点上为不同链路分配有相互独立的状态容器。在状态容器中设置有一个当前FEC编码值,当传输链路初建立时,该值等于FEC编码初始值。容器中还设有一个缓存区,存有最近发送的 $N$ 个Packet,以应答下一节点发来的重传请求,暂将 $N$ 设为20。在发送方,由应用层送出的数据先流经编码转换模块,封装至Packet,然后再经发送模块发出。这些数据在编码转换模块中主要的处理步骤如下:(1)对要封装的数据进行CRC校验码计算,将得到的校验码写入Packet头部;(2)根据当前链路的当前FEC编码值,对数据进行相应等级的编码;(3)将该FEC编码值写入Packet头部,供下一节点解码使用。

当下一跳节点收到数据包后,先取出Packet头部的FEC编码值,对其中封装的数据进行相应的解码运算,然后将其进行CRC校验,若校验出错,丢弃该Packet,向上一节点发送NACK请求重传,并累计误码包个数。若校验无误,分两种情况处理:(1)若节点为接收方,将数据传至上层;(2)若节点不是接收方,将数据送至编码转换模块,根据下一跳链路的当前FEC编码值进行重新编码,然后由发送模块送出。

接收模块中设有一个接收窗口值 $W$ ,每收到 $W$ 个数据包,便计算出当前的 $PER$ ,并将该 $PER$ 作为链路最新的状态信息反馈给上一节点。将 $W$ 设为10。同时设有一链路有效计时器,当超过某一段时间间隙后,没有收到该链路上的数据包,则将该链路的状态容器清除,到下一次连接建立时,再重新为该链路分配状态容器。

上一跳节点在收到链路状态信息之后,检验当前链路的 $PER$ 是否超过设定的限值,若大于上限值,则将当前FEC编码值改为高一级的编码值;若低于下限值,则改为低一级的编码值。考虑到无线链路上多为突发性误码,所以对状态信息不进行累计判定,只根据最新的选择编码等级。

### 2.2 编码状态转换

为区分有线链路和无线链路,将FEC初始状态设定为无FEC,因为在有线链路中误码的情况极少出现,而无线链路却随时可能出现很高的BER,需要FEC保护。因此一旦检测到链路上出现误码丢包,立即进入自

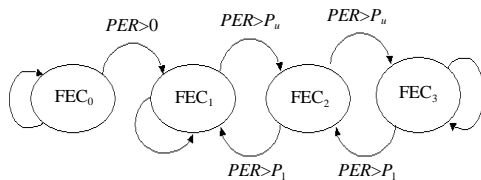


图1 自适应FEC编码状态转换

适应FEC编码状态,即认为当前链路为无线链路,始终会有不同等级的FEC对数据进行保护。编码状态转换如图1所示。图中 $P_u$ 、 $P_l$ 分别为 $PER$ 的上下限值,设 $P_u$ 为0.2, $P_l$ 为0.1。FEC编码采用8 bit符号的Reed Solomon编码,码长255 byte,信息段长度不够时补0进行编码解码,发送时则去掉添补的0以节省带宽。FEC<sub>1</sub>为RS(255, 249),FEC<sub>2</sub>为RS(255, 245),FEC<sub>3</sub>为RS(255, 241)。

### 3 仿真与性能分析

为了验证基于主动网的自适应FEC性能,以Gilbert模型为无线链路误码模型,在主动实验网上进行仿真实验。主动实验网是在IP网络基础上构建的一个虚拟上层网络,网络节点使用Linux操作系统。拓扑图如图2所示,图中节点1、2、3、4都是主动节点。上层网络本身可看成是一个完整的网络,有独立于IP网的地址空间和路由表,采用(Active Network Transfer System, ANTS)作为主动节点的执行环境。主动节点中的服务通过发送特定的主动包来激活完成。

Gilbert模型被广泛应用于模拟无线环境中的突发错误。该模型以有两种状态的马尔可夫链为基础:G(For Good)和B(For Bad or For Burst)<sup>[7]</sup>。在状态G中不会发生错误。

如图3所示,从状态G转换到状态B的概率为R,在状态B中每个bit发生错误的概率为1-h,因此错误发生的概率  $P_b = (1-h)R/(r+R)$ 。其中,  $R = 1/L_G$ ;  $r = 1/L_B$ ;  $L_G$ 和 $L_B$ 分别为状态G和状态B的平均长度。由于Gilbert模型的每个状态是无记忆的,依据几何分布是指数分布的离散等价分布,利用公式  $G(f) = \ln(u)/\ln(1-f)$  随机地生成各个状态的长度  $G(f)$ <sup>[2]</sup>,其中u是从0~1均匀分布的随机数,f是从该状态转移到另一状态的概率。参照文献[3],Gilbert模型的参数设置如表1所示。

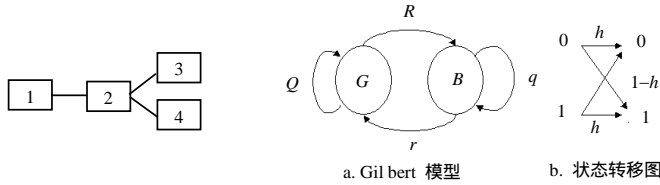


表1 Gilbert 模型参数表

$P_b$	R	r
0.000 15	0.006	0.050
0.000 75	0.006	0.007

图2 主动实验网拓扑图

图3 Gilbert模型示意图

实验中从节点1到节点3、节点4到节点1分别发包,各条链路的误码仿真相互独立。以节点1到节点3为例,从节点1发出的包先经过节点2,在节点2进行错误检测和恢复,对1到2之间的链路进行误码估计,并将状态信息反馈至节点1,使其能依此对后续发出的数据包调整FEC等级。节点2将检查无误的数据包再转发至节点3,对于有误的数据包则向节点1要求重传。节点3同样完成FEC协议中接收模块的功能,对节点2到3之间的链路进行误码检测和状态反馈,使节点2得以对后续发出的包转换编码等级,只是节点3是接收方,因此将检查无误的数据传至上层,而不再进行转发。从节点4到1发包也是如此,这样节点2即同时面向多个连接,实验以此来验证可凭借链路状态容器来保证多条链路的误码检测和控制互不干扰。

仿真中每个Packet长度为1 020 bytes,测试时发送的有效数据量(即传输的信息量)固定,这样由于不同等级纠错编码附加的冗余数据(即监督段数据)量不同,各种情况下发送的数据总量会有不同。因为协议是基于跳到跳,所以用于分析性能的数据是取自点到点间的单条链路,而不是端到端间的多条链路。由于误码模型的随机性,实验结果是多次测试的平均值。表2中显示了在高BER和低BER情况下各个FEC的性能,发送有效数据各为1 000 kbytes。

由于固定FEC编码参数的固定,得到FEC<sub>1</sub>、FEC<sub>2</sub>、FEC<sub>3</sub>的冗余数据占有效数据的2.4%、4.1%和5.8%,又从表2中可得:(1)  $P_b = 0.000 15$ 时,自适应FEC的冗余数据比例为2.9%,收到的有效数据(经纠错后检查无误的信息数据)占发送总数据的94.2%,固定FEC的则分别为93%、96%和94.4%;(2)  $P_b = 0.000 75$ 时,自适应FEC的冗余数据比例为5.5%,收到的有效数据占发送总数据的70%,固定FEC的则为17.7%、49.9%和72.4%。

表2 低BER下各个FEC的性能比较

$P_b = 0.000 15$	误包数	收包数	冗余包数	平均PER
Without FEC	711	293	0	0.708
FEC <sub>1</sub> (255,249)	48	981	25	0.048
FEC <sub>2</sub> (255,245)	1	1 044	41	0.001
FEC <sub>3</sub> (255,241)	1	1 062	59	0.001
Adaptive FEC	31	1 003	30	0.031

表3 高BER下各个FEC的性能比较

$P_b = 0.000 75$	误包数	收包数	冗余包数	平均PER
Without FEC	996	8	0	0.992
FEC <sub>1</sub> (255,249)	842	187	25	0.818
FEC <sub>2</sub> (255,245)	502	543	41	0.480
FEC <sub>3</sub> (255,241)	251	812	59	0.236
Adaptive FEC	276	784	56	0.260

(下转第773页)

## 6 结束语

本文设计的水印系统,结合了鲁棒性水印和脆弱性水印的优点,在 $\pm 0.05$ 的检测范围内,对多种攻击均可检测到水印。且可以判断攻击发生的位置,以及其中几种攻击的类型。同时,在水印嵌入位置 $L$ 和原始水印摘要的传输中,可采用公钥体制来保证安全。当符合定义2时,嵌入强度可以达到30,但可嵌入水印的块会减少。

本文的研究工作得到了电子科技大学青年科技基金(YF021405)的资助,在此表示感谢!

### 参考文献

- [1] WONG P W. A watermark for image integrity and ownership verification[J]. Proc. Int. Conf. Image Processing, 1997, 1: 680-683.
- [2] BYUN S C, LEE I L, SHIN T H, et al. A public-key based watermarking for color image authentication[C]// IEEE, Korea, 2002: 593-596.
- [3] 黄继武, SHI Y Q, 姚若河. 基于块分类的自适应图像水印算法[J]. 中国图像图形学报, 1998, 4(A)(8): 460-463.

编辑 漆蓉

(上接第735页)

在不同BER情况下,自适应FEC都能以较少的冗余数据获得较高的接收效率,固定FEC虽然在某个BER下可能表现出较好的性能,但当BER改变时则缺少相应的应变能力。

为了验证自适应FEC在BER动态变化时的性能,在发送数据过程中改变链路的BER测试了各个FEC的效能。每次发送有效数据均为3 000 kbytes。

在动态变化中,BER在0.000 75与0.000 15之间来回跳变,每发送500个Packet跳变一次。图4中 $P_a$ 表示平均PER, $n$ 表示已发送的Packet个数。可以看到自适应FEC的平均PER明显优于FEC<sub>1</sub>和FEC<sub>2</sub>,与FEC<sub>3</sub>则非常贴近。由于计算的是收到所有包的平均PER,累积了前面的丢包过程,所以曲线的波动幅度逐渐减小,但仍可看出 $P_a$ 变化时PER的波动过程。FEC<sub>3</sub>的冗余数据量始终为5.8%,自适应FEC在这里的冗余数据比例为4.1%,可见自适应FEC能尽量用较少的开销得到较多的收益。

## 4 结束语

本文提出了一种应用于Ad hoc网络的基于主动网的自适应FEC协议,用以改善无线信道BER突发多变的状况。通过仿真实验进行了性能分析和比较,其结果表明,基于主动网的自适应FEC可有效降低无线信道中的PER,并能根据实际链路状况尽量减少冗余负担,增加带宽的利用率,为无线传输性能的改进提供了一种有效的手段。

### 参考文献

- [1] 王 斌. 主动式网络及应用关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2001.
- [2] 赵志峰, 郑少仁. Ad hoc网络体系结构研究[J]. 电信科学, 2001, 17(1): 14-17.
- [3] Miyoshi M, Sugano M, Murata M. Performance improvement of TCP on wireless cellular networks by adaptive FEC combined with explicit loss notification[C]// Vehicular Technology Conference IEEE, Birmingham, 2002, 55(2): 982-986.
- [4] Ayanoglu E, Paul S, LaPorta T F, et al. AIRMAIL: A link-layer protocol for wireless networks[J]. Wireless Networks, 1995, 1(1): 47-60.
- [5] Eckhardt D A, Steenkiste P. A trace-based evaluation of adaptive error correction for a wireless local area network[J]. Mobile Networks and Applications, 1999, 4(4): 273-287.
- [6] Liu Benyuan, Goeckel D L, Towsley D. TCP-cognizant adaptive forward error correction in wireless networks[C]// Global Telecommunications Conference GLOBECOM IEEE, Taipei, 2002, 02: 2128-2132.
- [7] Lemmon J J. Wireless link statistical bit error model[EB/OL]. <http://its.bldrdoc.gov/pub/ntia-rpt/>, 2002-06-16.

编辑 孙晓丹

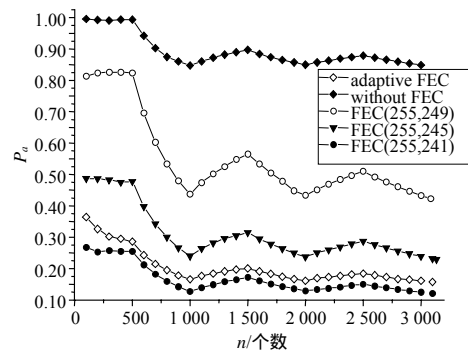


图4 各FEC在BER作动态变化时平均PER曲线图