



一种应用于实时业务的非恒速码传输策略^{*}

赵少华, 陈巍, 白铂, 牛志升, 曹志刚

(清华大学微波与数字通信国家重点实验室 北京 100084)

摘要: 由于具有良好的信道自适应和低反馈数据量的优点, 非恒速码有很好的应用前景。然而由于其自身编码的特点会造成数据传输延时, 加上其对反馈链路质量的好坏敏感, 直接影响了它在实时数据传输业务方面的应用。研究了随机反馈的 ACK 延时对非恒速编码性能的影响, 提出一种新的 LT 编码实时数据传输策略, 以解决传输系统实际反馈链路的非理想状况对通信质量造成的影响, 实现了反馈不可靠情况下 LT 码的实时数据传输。

关键词: 非恒速码; LT 编码传输策略; 实时数据传输; 反馈延时

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.10.011

A Rateless Code Transmission Strategy Based on Real Time Service

Zhao Shaohua, Chen Wei, Bai Bo, Niu Zhisheng, Cao Zhigang

(State Key Laboratory on Microwave and Digital Communications, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Rateless codes has the advantage of good channel adaptivity with a low amount of feedback data. However, the data transmission delay caused by its own coding characteristics and its sensitivity of the feedback link quality directly affects its application in real-time data transmission services. The random delay of feedback ACK which reduce the LT coding's performance was discussed, and then a new LT code based real-time transmission strategy was proposed to address the impact of non-ideal conditions of the feedback link. This strategy can achieve higher data throughput in non-ideal feedback conditions.

Key words: rateless code, LT code transmission strategy, real-time data transmission service, feedback delay

1 引言

非恒速编码^[1]不仅具有很好的自适应信道速率变化的特点, 同时也是一种优秀的差错控制方式^[2], 所以应用于删除信道的非恒速编码可以在保证可靠传输的同时, 不仅能使数据传输自适应信道衰落等变化, 还可以在高误码率的通信环境下减少反馈信道的压力。实用的非恒速编码有 LT 码(luby transform code)^[3]和 Raptor 码, 其中 Raptor 码已经分别被 DVB-H 标准^[4]和 3GPP 组织的多媒体广播多播业

务(MBMS)标准^[5]采用。而 LT 码作为 Raptor 码^[6]的编码基础, 其本身也是一种实用的非恒速码, 而且它还具有低复杂度、易于实现的优点。

然而, 非恒速码独特的编码方式也会给通信系统带来数据传输延时, 这影响了其在视频传输等实时数据传输方面的应用。首先, 对于 LT 码来说, 实际应用中编码分组长相对固定, 其对通信系统带来的数据传输延时主要取决于其编码分组数, 参考文献[7]和参考文献[8]分别讨论了不同编码分组长对 LT 编码性能的影响和 LT 编码度分布的设

^{*} 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)资助课题(No.2013CB336600, No.2012CB316000), 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室开放课题, 国家自然科学基金创新研究群体资助课题(No. 61021001)

计,如图1所示,系统传输数据的实时性会随着LT编码分组数的增大而减小,同时考虑编码复杂度^[9],而实时视频的传输需要在较小的编码分组数下完成,所以这将导致LT编码在应用于实时视频传输时与传统LT编码策略不同。其次,在LT编码的实际应用中,考虑到编码的运算量和整个系统数据的延时,非恒速编码单个信息组的编码分组数不是很大,这使得ACK反馈信息在反馈信道的延时影响上相对明显而不得不加以考虑。最后,在实际的实时业务中,ACK反馈信息经过衰落反馈信道后还可能会出现随机间隔到达,使得更不得不考虑传统LT编码没有考虑的非理想情况下反馈信道对LT编码性能的影响。然而在非恒速码被应用到无线信道后,参考文献[10]研究了在有延时约束情况下的衰落信道中非恒速编码,参考文献[11]研究了多路中继衰落信道中的非恒速编码,参考文献[12]研究了在高斯信道下非恒速码,参考文献[13]提出一种物理层非恒速码的编码策略,非恒速码的研究都是建立在反馈链路理想、无延时影响的假设下的;在非恒速码实时数据传输的研究中,参考文献[14]研究了利用反馈信道传输除ACK外的解码状态信息从而加快解码速度,参考文献[15]讨论了类似原理在有无优先保护下LT编码数据传输的性能,同样不考虑反馈信道的数据延时情况。

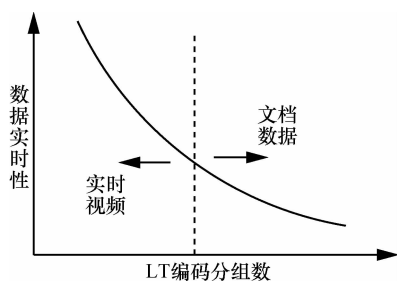


图1 传输数据实时性与 LT 编码分组数关系

综上,基于实际实时业务应用的新型LT编码传输策略的提出将具有重要意义。Raptor码性能高于LT码,但具体非恒速码的选取不影响本文传输策略的本质,为了表述简单起见,本文选择结合LT码提出新传输策略。于是本文首先讨论了反馈信道非理想情况时ACK反馈信息延时的

大小以及随机性对LT码性能的影响,然后提出一种有效减小该影响的LT编码传输策略,从而解决实时链路中实时业务的非恒速码传输问题。

2 系统模型

系统模型如图2所示,在发送端,首先针对信息分组每一组进行如下操作:将一组信息分成 K 个长度为 P bit的等长LT数据分组,然后随机选 d 个数据分组作按位异或运算,作为一个LT编码分组(称这样的数据分组和编码分组具有邻接关系),按照同样方式可生成并发送 n 个对等的LT编码分组直到收到ACK;收到ACK后以同样的方式发送下一组信息。这里 d 称为LT编码度数,是个随机变量,其概率分布工程上采用鲁棒弧度分布^[1]:

$$\rho(d) = \frac{\mu(d) + \nu(d)}{\sum_d (\mu(d) + \nu(d))}, \quad d = 1, 2, \dots, K \quad (1)$$

其中:

$$\mu(d) = \begin{cases} \frac{1}{K}, & d = 1 \\ \frac{1}{d(d-1)}, & d \geq 2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\nu(d) = \begin{cases} \frac{S}{Kd}, & d < \frac{K}{S} \\ \frac{S}{K} \ln\left(\frac{S}{\delta}\right), & d = \frac{K}{S} \\ 0, & d > \frac{K}{S} \end{cases} \quad (3)$$

$S = \lambda \ln(K/\delta) \sqrt{K}$, δ 和 λ 是度分布的参数, δ 表示当收到 $K + O(\sqrt{K} \ln^2(K/\delta))$ 编码分组时的解码最大错误概率, λ 是一正参量且满足:

$$\frac{1}{K} \frac{\sqrt{K}}{\ln\left(\frac{K}{\delta}\right)} < \lambda < \frac{1}{2} \frac{\sqrt{K}}{\ln\left(\frac{K}{\delta}\right)} \quad (4)$$

在接收端,将CRC校验正确的分组放入缓存器中,当收到 $K + \epsilon$ 个编码分组后,根据分组头携带的编码度信息做如下解码操作:找到度数为1的编码分组作为解码节

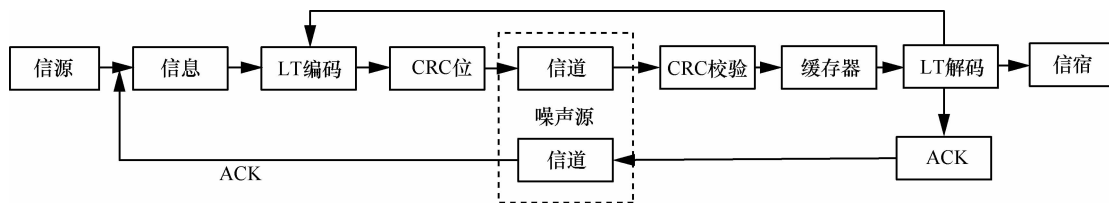


图2 系统模型



点,由于解码节点是其唯一数据邻接分组的完全复制,所以根据编码信息可以恢复这一对应邻接数据分组,其实该邻接数据分组内容上就是这个编码节点;同时将恢复的数据分组与其所有的邻接编码分组按位异或并且使这些编码分组的度数减1;继续找度数为1的编码分组,如果找到则重复上面的操作直到所有 K 个数据分组都恢复,即解码成功,发送反馈信号 ACK,如果没有找到度数为1的分组则解码失败,需要再接收 ε 个编码分组重新解码。

在该系统模型下,由于底层反馈链路是面向非链接传输的,反馈信息不仅会存在随机的延时现象甚至会导致无法为接收端提供可靠的 ACK 反馈保障;另外受上行链路不对等带宽的限制,ACK 反馈分组延时与下行链路数据分组延时对比相对较大,从而加剧了其对 LT 编码性能的影响。于是,本文在传输层调整改进传统 LT 码的传输方式,提出非停等式 LT 码传输策略,该策略除拥有传统 LT 码的优点之外,还解决了反馈信道延时、不可靠等现象造成的系统性能下降的缺陷,满足了视频流实时性的要求,充分最大化 LT 码的传输效率。

3 非停等式 LT 码传输策略与理论分析

3.1 非停等式 LT 码传输策略

为了减小因反馈 ACK 信息分组的延时而给 LT 编码性能带来的影响,提高传统 LT 码的传输效率,本文通过改进传统 LT 码传输策略,提出了非停等式 LT 码传输策略。在编码端设置 m 个并行编码缓冲和 1 个发送队列缓冲,在解码端设置 m 个并行解码缓冲和一个接收队列缓冲。

传输策略具体如图 3(a)所示,在编码端将发送信息分成等长信息组后,依次放入编码队列,其中前 m 个信息组放入编码缓冲,当前编码指针指向编码缓冲 1;然后对当前编码指针所指向的编码缓冲内的信息组进行传统 LT 编码,生成 p 个编码分组并依次发送;当前编码指针指向下一个编码缓冲,如果当前指向编码缓冲 m ,则当前编码指针指向编码缓冲 1;如果收到来自解码缓冲 i 的 ACK 反馈分组则从编码队列头部取一信息组放入编码缓冲 i 中,否则继续编码直到传输结束。在解码端,如图 3(b)的流程所示,每收到一个编码分组,依据从编码分组头得知的解码缓冲信息将其放入对应的解码缓冲;若某个解码缓冲中的分组数大于 K ,则进行一次 LT 解码,如果解码成功则将解码信息组放入解码队尾并向编码端发送相应 ACK 反馈,然后继续接收分组解码直到传输结束。

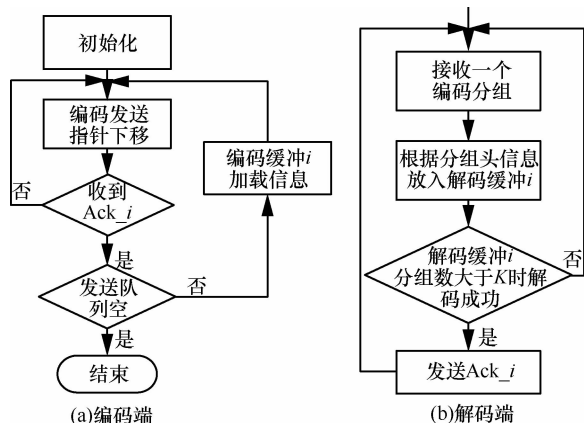


图3 非停等式 LT 码传输策略流程

3.2 非停等式 LT 码传输策略的理论分析

下面从理论上分析并证明当 LT 编码分组数 K 较小时,LT 码的反馈 ACK 分组到达解码端的延时对 LT 编码性能的影响,同时证明了非停等式 LT 码传输策略在对抗反馈延时方面的优秀表现。

定义 LT 码的传输效率为通信系统实际数据的传输速率与编码发送速率之比:

$$\eta = \frac{R_r}{R} \quad (5)$$

其中 R_r 表示系统实际接收速率,也就是接收端解码后形成的数据速率; R 表示 LT 编码完成后向信道发送数据的速率。由于编码自身存在为换取可靠性带来的冗余,当信道实时带宽减小时,LT 码的实时传输效率会减小,这样实现以换取信道变化的自适应性;另外 LT 码是依靠反馈信道辅助完成可靠传输的,如果反馈不及时会使发送端重复发送已解码的信息,将使数据的传输产生不必要的冗余传输,所以反馈信道的质量直接影响 LT 码的传输性能,如图 4 所示。



图4 反馈 ACK 有延时下的 LT 编码

引理 传统 LT 码在有反馈延时情况下的传输效率为:

$$\eta = \frac{K}{E(n) + E(r)} \quad (6)$$

证明 由 LT 编码规则,发送端将每个分组含有 P_m bit

信息的 K 个信息分组的信息组编码成 K 个每个都包含有 P_c bit 信息的编码分组,然后经过 t_c 的时间间隔发送,则其发送速率 $R=P_c/t_c$;根据 LT 的编码规则有 $P_m=P_c$;设接收端接收到 $n_i=K+\varepsilon$ 个编码分组后可成功解码,则实际数据传输速率为:

$$R_r = \frac{l \cdot K \cdot P_m}{\sum_i (n_i \cdot t_c + t_{di})} \quad (7)$$

其中, l 为总信息组数, n_i 和 t_{di} 分别为第 i 个信息组完成解码需要的编码分组数和解码后 ACK 的反馈延时,即接收端发送 ACK 后经过时间 t_{di} 后到达发送端。令 $t_{di}=\gamma t_c$, 结合 $P_m=P_c$ 带入式(1)有:

$$\eta = \frac{l \cdot K \cdot P_m / R}{\sum_i n_i \cdot t_c + \sum_i \gamma_i \cdot t_c} = \frac{K}{E(n) + E(\gamma)} \quad (8)$$

$\gamma_i=t_{di}/t_c$ 表示第 i 个信息组反馈信息的相对延时,在实际 LT 应用系统中,反馈信息很小,但要求较快的发送分组反应速度,随机参数 γ 对于 LT 码通信系统的延时敏感程度有重要意义。

从式(6)可以看出,当反馈相对延时很小时,传输效率近似为 $\eta=K/E(n)$,即成为 LT 码的编码效率,它取决于 LT 码的度分布 $\rho(d)$ 、参数 δ 和 λ ,理论上当 LT 编码的编码分组平均度数为 $O(\ln(K/\delta))$ 时,平均需要接收 $K+O(\sqrt{K} \ln^2(K/\delta))$ 个编码分组即可保证以不大于 δ 的错误概率完成译码。从后面的仿真结果可以得出,随着编码分组数 K 的增加编码效率趋向于 1,但此时增加了数据分组的平均延时,影响通信系统实时性。其实从式(6)中可以看出,只要给定 $E(\gamma)$,增大 K 是减少反馈延时对传输效率影响的有效方法。

定理 非停等式 LT 码传输策略在有反馈延时情况下的传输效率为:

$$\eta = \frac{K}{PE(s)} \quad (9)$$

此时反馈延时满足 $\max\{t_{di}\} < pmt_c - 1$ 。

证明 非停等式 LT 码传输策略的实际传输速率为:

$$R_r = \frac{l \cdot K \cdot P_m}{\sum_i (s_i \cdot p \cdot t_c + t_{di})} \quad (10)$$

由图 5 易知,非停等式 LT 码传输策略的延时为:

$$t_{di} = \begin{cases} 0, & t_{di} < pmt_c - 1 \\ t_{di} - pmt_c - 1, & t_{di} \geq pmt_c - 1 \end{cases} \quad (11)$$

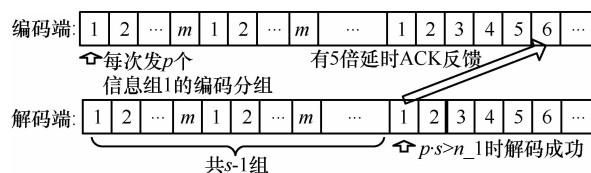


图 5 反馈 ACK 有延时下的非停等式 LT 码传输策略

这样如果可以保证 $\max\{t_{di}\} < pmt_c - 1$,同前引理,即得非停等式 LT 码传输策略的传输效率为:

$$\eta = \frac{R_r}{R} = \frac{K}{pE(s)} \quad (12)$$

值得提出的是,如果是擦除信道传输,则解码成功需要分组数 $n = n_1 + n_2$,分别来自 LT 码本身,需要解码分组数 n_1 和信道擦除分组数 n_2 ,所以信道中断数 $E(n_2)$ 相对增大也会减小反馈延时带来的影响。如果两者对立的话,此时有:

$$R_r = \frac{K}{E(n_1) + E(n_2) + E(\gamma)} R \quad (13)$$

R 为实际信道发送速率,信道状态的好坏直接反映在 $E(n_2)$ 上,从而达到动态调节实际信息速率 R_r 以适应信道误码率的变化,这也就是 LT 码的信道速率自适应性的本质。所以,可以通过增加 LT 编码效率减少 $E(n_1)$ 或者通过非停等式 LT 码传输策略减少 $E(\gamma)$ 来提高 LT 码的传输效率。

3.3 非停等式 LT 码传输策略性能

3.3.1 传输效率

式(12)中,如前所述 p 表示对于同一个数据每组发送的 LT 编码分组数, s 表示这个数据在接收端完成解码需要的组数,即一般满足 $(s-1) \cdot p + 1 \leq n \leq s \cdot p$,这意味着将会有 $s \cdot p - n$ 个编码分组冗余浪费。由策略对反馈延时的最大容忍 $\max\{t_{di}\} < pmt_c - 1$ 可知,最大容忍关于 p 成线性关系。对于不同的 p 有如下结论。

- 当 $p=1$ 时, $E(s)=E(n)$,则式(12)简化为 $\eta=K(n)$,即反馈延时对系统的传输效率完全没有影响,此时的最大容忍为 $\max\{t_{di}\} < mt_c - 1$,这时可以通过增大缓冲个数 m 来增加对反馈延时的最大容忍。
- 当 $p>1$ 且恒为定值时:由于 n 趋于 $K+\varepsilon$ 完成编码,并且在 $K+\varepsilon$ 处很快收敛^[3],设计系统时可合理选择 K ,如取 $K+a \cdot \varepsilon = s \cdot p$,使得策略的冗余分组数均值趋于 $a \cdot \varepsilon$ 。 $p>1$ 时的好处是可以减少收端的尝试解码次数,同时在相同的延时容忍下 p 的增大减少了缓冲个数 m 。



- 另外,当 p 不为恒定值时,可以使 p 在解码前递减,这样得到增大延时容忍和传输效率之间的折中。

综上,非停等式 LT 码可以在最大反馈延时容忍之内消除反馈延时的影响,达到存在反馈延时状况下传输效率的最优状态。

3.3.2 数据延时

LT 编码本身的数据延时为 n 个数据分组的延时,如果反馈延时为 γ 个数据分组时间的话,最终造成的平均数据延时是 $E(n)t_c + E(\gamma)t_c$; 视频实时传输需要较高带宽,所以反馈物理信道的不稳定造成的小延时相对于数据分组时间也是可观的,同时编码分组数 K 不能太大,所以 $E(\gamma)$ 和 $E(n)$ 可能几乎在一个数量级上,即可以为 $c \cdot E(n)t_c$,所以经典 LT 在反馈延时信道下也会增加数据传输延时;非停等式 LT 码在最大反馈容忍范围内没有反馈延时,延时为 $(s-1) \cdot p \cdot m + p$,平均数据延时为在 $m \cdot E(n)t_c$ 的数量级。所以非停等式 LT 码增加了缓冲以容忍反馈信号的延时,最终增加数据传输效率,虽然造成了一定数据传输延时,但是这些延时在反馈信道存在延时的情况下是不可避免的,相对经典 LT 在反馈延时信道下数据传输延时是可以接受的。

3.3.3 实现复杂度

在实现上,该传输策略相对传统 LT 编码只是加入了缓冲和数据队列,算法和编解码上没有增加复杂度,考虑到传输效率的增益,这些改进比较现实。本文已经通过 PC 机和 LTE 实验平台实现了该传输策略的应用,详见第 4 节。

4 仿真与实验结果

4.1 软件仿真结果

在 MATLAB 仿真中,发送端将信息分成固定大小的

信息组,分别经过 LT 编码或非停等式 LT 码传输策略后加入 CRC 校验,再经过 BPSK 调制发送到 AWGN 信道或瑞利衰落信道无线信道,接收端依次经过解调、校验、擦除误码信息后再解码得到结果。具体仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数

参数名称	参数值
LT 编码度分布 (δ, λ)	顽健弧度分布 (0.05, 0.1)
调制模式	BPSK
LT 编码分组数 K	1 000
反馈延时分布	高斯分布
并行缓冲数 m	10

首先,由式(13)可知 LT 编码的参数的选取会影响系统的传输效率,通过仿真验证并找到最合适的 LT 编码参数 (δ, λ) 以及编码报数 K 的取值。图 6(a)为当 λ 一定时, δ 取不同值情况下 LT 编码传输效率随延时均值增加的变化,显然,随着反馈链路的延时均值增大,传输效率减小。在系统具有相同反馈延时,传输效率随 δ 的增大而增大,但在 $\delta > 0.5$ 之后增加得不是很明显。同样图 6(b)显示当固定 δ 时,相同反馈延时条件下 LT 编码的传输效率会随 λ 增大而减小,但当 $\lambda > 0.5$ 降低时不明显,所以一般情况下取定 δ 时,取 λ 为其下界值。

本文通过软件模拟仿真得出分别在理想信道、AWGN 信道和瑞利衰落信道中传统 LT 编码和非停等式 LT 码传输策略的传输效率受随机反馈延时均值变化的影响。从图 7 可以看出,传统 LT 编码的传输效率会随着反馈延时均值的增大而有较明显的减小,而非停等式 LT 码传输策略则在满足最大反馈延时小于并行缓冲数时,反馈延时均值的增大不会对传输效率造成影响。另外可以看出在相同编码方式和反馈延时状况下,理想信道的传输效率总是大于

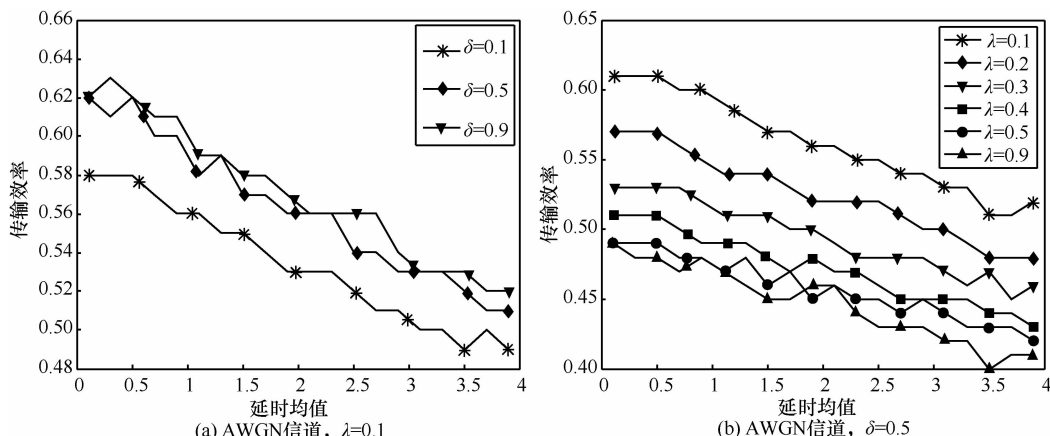


图 6 LT 编码参数对传输效率的影响

AWGN信道,同时AWGN信道总是大于衰落信道,这反映出LT编码的信道状况的自适应性。

另外,可以从图8(a)看出反馈信道延时的方差也会对LT传输效率造成影响。当缓冲数为4时,在AWGN信道中反馈延时的方差越大,非停等式LT码传输策略的传输效率对反馈延时的均值大小越敏感,也就是说,在反馈延时的方差很大的情况下,很小均值的反馈延时也会对非停等式LT码传输策略的性能产生影响。从图8(b)中还可以看到,一定范围内对于相同的延时均值,延时的方差越大,系统的传输效率越差。

4.2 实验仿真结果

为了验证LT传输策略同时在可靠传输和延时容忍都

有优秀表现,建立基于LT码的无线LTE实时链路上的实时传输视频通信系统。将视频文件经过VLC视频串流编码,实时通过非停等式LT编码后由LTE实验平台基站或WLAN发射;在接收端由LTE实验平台用户端或WLAN接收,通过LT解码后传给VLC播放器完成实时播放。软件部分,本文使用MS Visual Studio 2010作为编译环境,通过MFC框架封装调用VLC库函数编写视频串流和视频播放功能,同时用C++编写实现非停等式LT码传输策略,结合相关驱动程序完成收发一体应用程序。

由于向数据传输的实时性和系统复杂性方面的折中,LT编码的分组数将远小于仿真时的分组数,这使得LT编码效率限制在50%左右,但由式(13)可知LT编码效率的

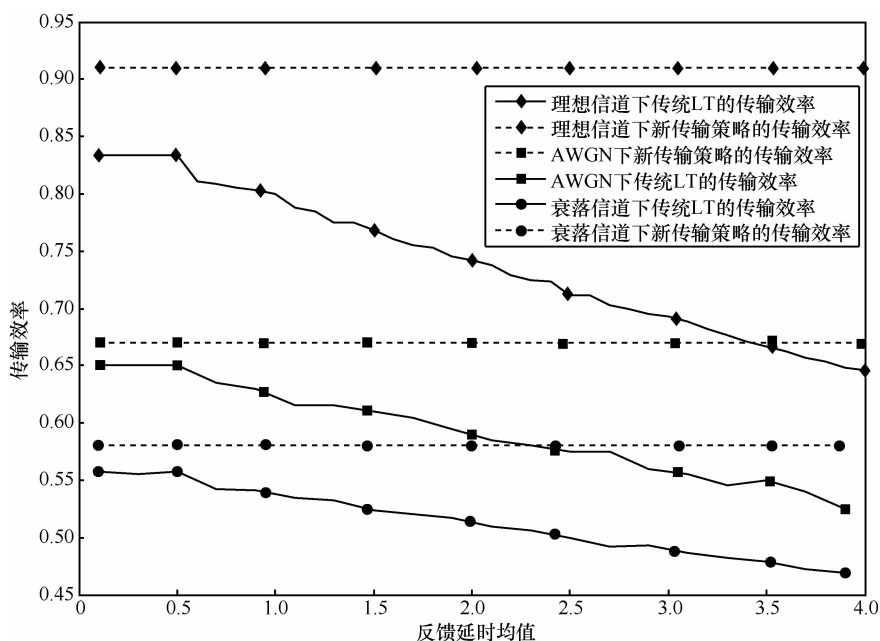


图7 反馈延时均值对传输效率的影响

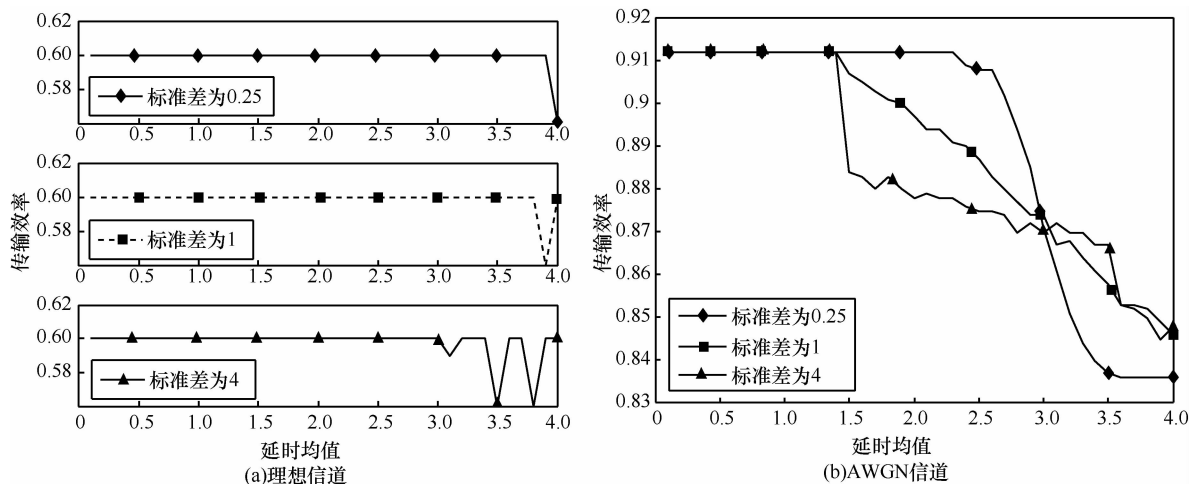


图8 反馈延时方差对传输效率的影响



高低和传输策略对反馈链路延时的敏感性,对通信系统传输效率的影响相对独立,所以这将不影响非停等式 LT 码传输对反馈信道延时的适应性的优秀表现。本文在发送端通过 LT 编码后以 1 Mbit/s 固定速率向接收端发送峰值码率为 500 kbit/s 左右、平均码率为 291 kbit/s 的 MPEG-4 视频文件,数据分别通过 WLAN 和 LTE 链路进行传输比较:由于 WLAN 上行带宽较大,在传统 LT 编码传输和非停等式 LT 码传输策略下的传输效率差别不大,接收端视频可以实现实时全程播放,在视频显示效果上与直接用普通 UDP 传输相比没有明显差别。而 LTE 环境中上下行带宽相差越大,反馈分组的相对延时越明显,若此时采用传统 LT 码传输,传输效率会下降,使接收端速率在 200 kbit/s 以下,视频无法顺利实时播放。若采用非停等式 LT 码传输则可消除该影响,视频数据可以在硬件设备所支持的最大带宽内传输速率很好地自适应传输,实际传输效率可以在 40%以上。

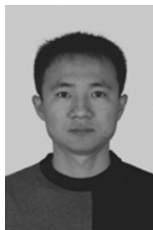
5 结束语

本文考虑到非恒速编码 LT 码无法适应实时数据传输的缺点,讨论了反馈 ACK 延时对 LT 码性能的影响,提出一种基于实际实时业务应用的新型 LT 码传输策略,即非停等式 LT 码传输策略,以解决传输系统实际反馈链路中的非理想状况对通信质量造成的影响。然后,本文分别通过理论分析、软件仿真和实际实时业务应用系统验证了非停等式 LT 码传输策略的传输效率和性能。采用非停等式 LT 码传输策略的实际系统可以在 LT 编码效率 50%左右时,减少反馈链路数据延时的影响,实现实际传输效率达 40%以上。

参考文献

- Byers J W, Luby M, Mitzenmacher M, *et al.* A digital fountain approach to reliable distribution of bulk data. Proceedings of ACM Special Interest Group on Data Communication, Stanford, 1988: 56~57
- Wang X, Chen W, Cao Z. ARQ versus rateless coding: from a point of view of redundancy. Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Ottawa, 2012: 3931~3935
- Luby M. LT codes. Proceedings of 43rd Annual IEEE Symposium Foundations Computer Science (FOCS), Vancouver, 2002: 271~280
- 3GPP TS 22.101. Technical Specification Group Services and System Aspects Service Aspects; Service Principles (Release 9), 2008
- ETS TS 102 472-2009. Digital Video Broadcasting (DVB); IP Data Cast Over DVB-H: Content Delivery Protocols, 2009
- Li H M, Marsland I D. A comparison of rateless codes at short block lengths. Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Beijing, 2008: 4483~4488
- Wang X, Chen W, Cao Z. Throughput-efficient rateless coding with packet length optimization for practical wireless communication systems. Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference, Miami, 2010
- Zao J K, Hornansky M, Diao Pei-lun. Design of optimal short-length LT codes using evolution strategies. Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation, Brisbane, 2012
- Dohyung Park, Sae-Young Chung. Performance-complexity tradeoffs of rateless codes. Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory, Toronto, 2008: 2056~2060
- Castura J, Mao Y, Draper S. On rateless coding over fading channels with delay constraints. Proceedings of 2006 IEEE International Symposium on Information Theory, Seattle, 2006: 1124~1128
- Khan T A, Tahir M. A half-duplex rateless coded protocol for a fading multi-way relay channel. Proceedings of Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), Las Vegas, 2012: 362~363
- Erez U, Trott M, Wornell G. Rateless coding for Gaussian channels. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(2): 530~547
- Tian S, Li Y, Shirvanimoghaddam M, *et al.* A physical-layer rateless code for wireless channels. IEEE Transactions on Communications, 2013, PP(99): 1~11
- Beimel A, Dolev S, Singer N. RT oblivious erasure correcting. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007, 15 (6): 1321~1332
- Sørensen J H, Popovski P, Østergaard J. Feedback in LT codes for prioritized and non-prioritized data. Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference(VTC Fall), Québec City, 2012

[作者简介]



赵少华,男,清华大学电子工程系硕士研究生,主要研究方向为非恒速编码、能量收割等。

- 3 任条娟,杨海波,陈友荣. sink 节点移动的无线传感网生存时间优化算法. 传感技术学报, 2012, 25(5):683~690
- 4 Hu X M, Zhang J, Yu Y, *et al.* Hybrid genetic algorithm using a forward encoding scheme for lifetime maximization of wireless sensor networks. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2010, 14(5): 766~781
- 5 朱艺华,沈丹丹,吴万登等. 无线传感器网络优化生存时间的动态路由算法. 电子学报, 2009, 37(5):1041~1045
- 6 Shu L, Zhang Y, Zhou Z, *et al.* Transmitting and gathering streaming data in wireless multimedia sensor networks within expected network lifetime. Mobile Networks and Applications, 2008, 13(3):306~322
- 7 Rao J, Biswas S. Data harvesting in sensor networks using mobile sinks. IEEE Wireless Communications, 2008,15(6): 63~70
- 8 Liu W, Lu K, Wang J, *et al.* Performance analysis of wireless sensor networks with mobile sinks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(6):2777~2789
- 9 Zhao M, Yang Y. Optimization-based distributed algorithms for mobile data gathering in wireless sensor networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(10):1464~1477
- 10 Gatzianas M, Georgiadis L. A distributed algorithm for maximum lifetime routing in sensor networks with mobile sink. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(3):984~994
- 11 Luo J, Hubaux J P. Joint sink mobility and routing to maximize the lifetime of wireless sensor networks: the case of constrained mobility. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18(3):871~884
- 12 陈友荣,王章权,程菊花等. 基于最短路径树的优化生存时间路由算法. 传感技术学报, 2012, 25(3):406~412
- 13 Sarimveis H, Alexandridis A, Bafas G. A fast training algorithm for RBF networks based on subtractive clustering. Neurocomputing, 2003, 51(5): 501~505
- 14 李明哲,金俊,石端银. 图论及其算法. 北京:机械出版社,2010

- 15 Dimitri B, Robert G. 数据网络(第二版). 卢刚,王康译. 北京:人民邮电出版社,2004

[作者简介]



王章权,男,浙江树人大学信息科技学院副教授,主要研究方向为电力电子技术、控制技术、无线控制。



陈友荣,男,博士,浙江树人大学信息科技学院讲师,主要研究方向为无线传感网、物联网。

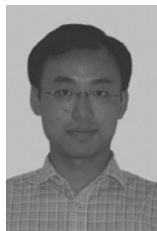


任条娟,女,浙江树人大学信息科技学院副教授,主要研究方向为无线传感网、车联网。

许森,男,浙江树人大学信息科技学院助教,主要研究方向为智能控制、车联网。

(收稿日期:2013-05-20)

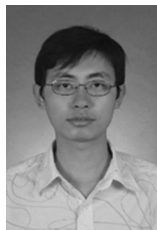
(上接第64页)



陈巍,男,清华大学电子工程系教授、博士生导师,主要研究方向为无线通信、信息论、应用优化等。



牛志升,男,清华大学电子工程系教授、博士生导师,主要研究方向为排队论、无线资源管理、绿色通信等。



白铂,男,清华大学电子工程系讲师、硕士生导师,主要研究方向为无线通信、信息论、随机图、组合设计等。



曹志刚,男,清华大学电子工程系教授、博士生导师,主要研究方向为移动通信、卫星通信、语音信号处理、认知无线电等。

(收稿日期:2013-09-19)