

基于数据包重要性的低时延广播重传算法

徐卓^{1,2}, 姚富强², 关胜勇², 许拔²

1. 中国人民解放军理工大学通信工程学院, 南京 210007
2. 中国人民南京电讯技术研究所, 南京 210007

摘要 无线广播信道存在噪声和多径衰落, 导致无线广播性能较差。传统的无线广播重传技术更多地考虑重传效率, 而忽视了重要数据包优先重传的问题, 使得一些特殊应用难以优先获得那些重要性较高的丢包。为提高无线广播重传的性能, 同时满足对数据包重要性敏感应用的需求, 本文在传统广播重传技术的基础上提出了一种基于数据包重要性的低时延广播重传算法。此算法在利用机会式网络编码方法编码重传包时, 根据各终端所含丢包重要性的级别, 分别对丢包进行编码优先权排序, 在满足各终端能够及时译码的基础上优先编码终端中重要性高的丢包, 权衡丢包重要性与参与编码丢包总的数量, 使得一次编码重传中, 参与编码的丢包数尽可能的多, 并且使重要性级别靠前的丢包优先参与编码, 如此不仅保持了一个较好的重传效率, 降低了传输时延, 同时又缩短终端获取高重要性丢包的时间。仿真结果表明, 在典型的无线信道条件下, 此算法不仅保持了现有的经典策略好的重传增益, 同时突出了重要性高的丢包能够优先获得的优点, 降低了传输时延。

关键词 通信技术; 广播重传算法; 机会式网络编码; 低时延

中图分类号 TN92

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.08.011

A Delay-sensitive Broadcasting Retransmission Algorithm Based on Significance of Packets

XU Zhuo^{1,2}, YAO Fuqiang², GUAN Shengyong², XU Ba²

1. Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China
2. Nanjing Telecommunication Technology Institute, Nanjing 210007, China

Abstract Because of noise and multipath fading in wireless channels, the performance of wireless broadcasting is unsatisfactory. Conventional wireless broadcasting retransmission technology takes retransmission efficiency into consideration, while the significance of lost packets is neglected, making it difficult to meet the demand of applications sensitive to packet significance. To improve the performance of wireless broadcasting and meet the demand for packet-significance-sensitive applications, a delay-sensitive broadcasting retransmission algorithm based on significance of packets (DBRA) is proposed on the basis of the conventional broadcasting retransmission technique. According to the significance level of lost packets, the algorithm gives priority to time-sensitive lost packets and terminals with significant lost packets, and finds the maximum number of coding opportunities in opportunistic network coding (ONC), thus the transmission efficiency is improved, and the transfer delay of packets is decreased and terminals need less time to get significant lost packets. Simulations show that this algorithm has a probability with better efficiency than other classical algorithms and significant packets have priorities in transmission under classical wireless channel conditions.

Keywords communication technology; broadcasting retransmission algorithm; opportunistic network coding; low-time-delay

收稿日期: 2013-09-26; 修回日期: 2013-12-20

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20130069); 中国人民解放军理工大学2013年预先研究青年基金项目(KY63ZLXY1301)

作者简介: 徐卓, 硕士研究生, 研究方向为无线通信及网络编码, 电子信箱: xuzhuoyes@163.com; 关胜勇(通信作者), 高级工程师, 研究方向为无线通信网络与通信信号处理, 电子信箱: gsy1sss@163.com

引用格式: 徐卓, 姚富强, 关胜勇, 等. 基于数据包重要性的低时延广播重传算法[J]. 科技导报, 2014, 32(8): 70-75.

由于噪声和多径衰落的影响,无线网络广播性能较低,同时有些无线广播技术应用,如视频直播、视频会议等,对时间敏感性较高,因此需要寻找一种具有高效率 and 低时延特性的无线广播传输方式。

前向纠错技术是一种纠正错误的有效方法,但是仍然无法满足无线通信需求。自动重传技术是一种无线通信有效方法,但是每个终端出现错误都重新广播,使得带宽利用率不高。Ahlswede 等^[1]基于网络信息流的概念提出了网络编码的思想,网络编码技术通过网络中间节点参与编码来达到网络多播容量。Ho 等^[2,3]提出的随机网络编码证明了网络编码技术的可行性。文献[4]、[5]提出了一种基于随机网络编码的重传最优策略,大大提高了重传效率,减少了重传次数,然而采用较大系数域的随机网络编码方式,复杂度较高。Katti 等^[6]提出了一种适应无线网络的网络编码方法,即机会式网络编码(opportunistic network coding, ONC),如图1所示,信源S向终端广播数据 X_1 、 X_2 、 X_3 和 X_4 ,各终端 T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 分别丢失 X_2 、 X_4 、 X_1 和 X_3 ,重传时利用异或编码运算形成重传数据包 $Y=X_1 \oplus X_2 \oplus X_3 \oplus X_4$,各终端可根据 Y 获得所需的丢包,共需1次重传。机会式网络编码将各终端的丢包进行异或处理再重发,减少了重传次数,由于其容易实现,因此得到了深入研究。

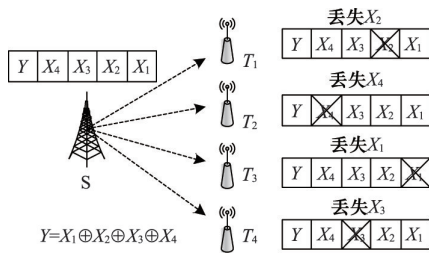


图1 基于机会式网络编码重传方法示例

Fig. 1 An example of retransmission algorithm based on ONC

文献[7]、[8]分别采用查找哈希表方法和图论理论来寻求重传编码数据包的最佳匹配,两种方法有效地减少了重传次数,提高了重传效率。然而由于参与传输的丢包有一定随机选择性,容易造成重要性高的丢包滞后重传,影响通信效率。文献[9]提出了一种基于机会式网络编码的广播传输算法(NCWBR算法),该算法首先编码每个终端的重要性最高的丢包形成重传包,各终端根据自身已知数据包的情况和重传包译码出丢包,不能译码的丢弃,接受下一次重传,但是在信道条件较差的情况下,形成的重传包译码率较低,导致重传效率较低。文献[10]在 ONC 算法的基础上提出了一种基于重要性的 ONCBT 算法,该算法同样是编码每个终端重要性最高的丢包形成重传包,但是各终端把不能译码的重传包缓存下来,之后根据多个重传包组合译码,此算法相比 NCWBR 算法,在付出缓存容量和增加计算复杂度的基础上,获得多组重传包组合译码的性能,提高了重传效率,然而此算法仍然没有解决信道条件差、译码率低的

情况。

本文在机会式网络编码的基础上,提出一种基于丢包重要性的低时延的无线广播重传算法(DBRA 算法)。在数据包重传过程中,此算法在终端能够及时解码的基础上,优先编码重要性高的数据包,再根据丢包信息矩阵,权衡丢包重要性和参与编码的丢包数量来合理匹配编码重传包,不仅满足每次重传,接收节点能够及时译出丢包,同时保持着较好的重传效率。

1 DBRA 算法编码策略

源节点向各终端广播数据包后,根据各终端反馈信息,形成丢包信息矩阵 P ,如图2所示, $P(i,j)=1$ 表示第 i 个终端丢失数据包 X_j , $P(i,j)=0$ 表示第 i 个终端成功得到数据包 X_j ,然后根据 P 矩阵形成重传包重传。把终端的丢包按照重要性排序,如果 $i < j$,则表明数据包 X_i 的优先级高于 X_j 。

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
T_1	1	0	1	0	0	0	0	0
T_2	0	0	0	0	0	1	0	1
T_3	1	0	0	1	0	0	0	0
T_4	0	0	0	0	0	1	1	0
T_5	0	0	0	1	1	0	0	0

图2 P 示例

Fig. 2 An example of P

因为视频直播和视频会议等对时延要求很高,尤其是靠近播放点的数据包对时延更为敏感,所以新算法优先考虑此类重要性高的数据包重传。但是为提高重传效率,则必须使每次重传包中参与编码的丢包尽可能的多,所以在重要性高的丢包能够及时译码的基础上,对于重要性较低的丢包合理匹配参与编码,提高重传效率。具体每次选择丢包编码重传包的策略如图3所示。

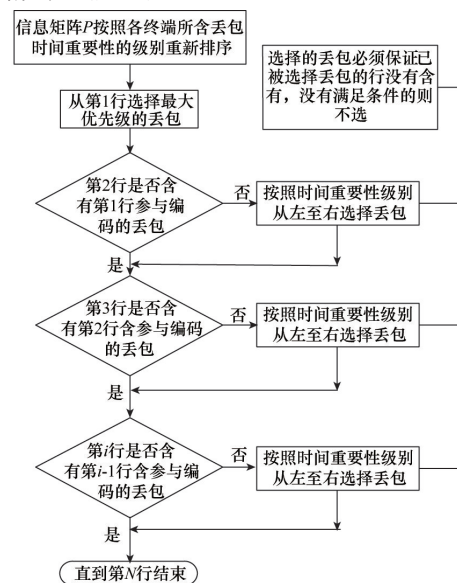


图3 选择丢包编码重传包流程

Fig. 3 Process of selecting lost packets for retransmission

1) 优先考虑具有重要性高的丢包的终端中的丢包参与编码。

2) 优先考虑终端中重要性较高的丢包参与编码。

3) 每次重传终端都能够及时译码。

图4是基于图2所示丢包信息矩阵选择丢包形成重传包的一个示例。图4(a)是将图2中矩阵P各终端按所含丢包重要性进行排序,然后按照图3所示策略形成重传包 $Y_1=X_1\oplus X_3\oplus X_6$,如果所有终端正确接收到重传包的话,则该终端可以根据已有的数据包与 Y_1 进行异或运算,得到 X_1, X_3, X_6 中一个丢包,此时矩阵P更新为图4(b)。例如,对于终端 T_1 ,可通过运算 $X_1=X_1\oplus X_3\oplus X_6\oplus X_3\oplus X_6=Y_1\oplus X_3\oplus X_6$ 得到丢包 X_1 。由于丢包 X_3, X_4 分别对终端 T_1, T_3 及时译码出 X_1 存在影响,所以没有参与重传包 Y_1 的编码。图4(c)同理按照图3所示步骤形成重传包,然后广播给各节点。直到所有节点成功得到所有数据包,则信源S停止发送重传包。由示例可以看出,如果采用传统的ARQ广播算法,假设每次重传都能够成功的话,共需要重传7次,而采用DBRA算法,只需要2次,大大提高了重传效率。同时除第一次重传中终端 T_5 没能得到 T_5 所急需的丢包外,其他终端都能够在每次重传中获得所需要的最紧急丢包,而且每次重传中所有终端中具有最高重要性的丢包肯定会参与编码重传。可见新算法对具有时间敏感性的广播服务具有更优的适用性。

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
T_1	1	0	1	0	0	0	0	0
T_3	1	0	0	1	0	0	0	0
T_5	0	0	0	1	1	0	0	0
T_4	0	0	0	0	0	1	1	0
T_2	0	0	0	0	0	1	0	1

(a) 第一次编码重传

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
T_1	0	0	1	0	0	0	0	0
T_3	0	0	0	1	0	0	0	0
T_5	0	0	0	1	0	0	0	0
T_4	0	0	0	0	0	0	1	0
T_2	0	0	0	0	0	0	0	1

(b) 第一次重传后终端状态

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
T_1	0	0	1	0	0	0	0	0
T_3	0	0	0	1	0	0	0	0
T_5	0	0	0	1	0	0	0	0
T_4	0	0	0	0	0	0	1	0
T_2	0	0	0	0	0	0	0	1

(c) 第二次编码重传

图4 DBRA算法示例

Fig. 4 An example of DBRA algorithm

2 DBRA算法性能分析

2.1 重传效率分析

重传效率主要跟重传次数有关。在相同的信道条件下,重传次数越少,则重传效率越高。利用机会式网络编码形成最佳的组合编码重传包是非确定性问题^[11],而DBRA算法能够接近最佳性能。

定理1 对于M个接收终端,当信息包矩阵P中N足够大时,DBRA算法的每个数据包平均传输次数约为

$$L_M = \frac{1}{1 - \max(p_1, p_2, \dots, p_M)} \quad (1)$$

其中 p_1, p_2, \dots, p_M 分别为各终端的丢包率。

证明 按照DBRA算法,在一次编码重传中,重传包中只含有各终端中的一个丢包。当N足够大时,每个终端选择余地增加到足够大,总能够选择一个与已选终端不冲突的丢包。假设每次重传都能被正确接收,那么所需要的重传次数由丢包率最大的终端决定,假设最大丢包率为 p_{\max} ,则DBRA算法的重传次数为

$$r_1 = Np_{\max} \quad (2)$$

由于重传中同样会丢失数据包,所以再次重传需要重传的次数为

$$r_2 = r_1 p_{\max} = Np_{\max}^2 \quad (3)$$

同理,第i组重传所需要的重传次数为

$$r_i = Np_{\max}^i \quad (4)$$

则总的重传次数为

$$r = \sum_{i=1}^{+\infty} r_i = \sum_{i=1}^{+\infty} Np_{\max}^i = N \sum_{i=1}^{+\infty} p_{\max}^i = \frac{Np_{\max}}{1 - p_{\max}} \quad (5)$$

而平均每个数据包传输次数为

$$L_M = \frac{r + N}{N} = \frac{Np_{\max} + N}{N(1 - p_{\max})} = \frac{1}{1 - p_{\max}} = \frac{1}{1 - \max(p_1, p_2, \dots, p_M)} \quad (6)$$

由定理1和文献[4]可以看出,DBRA算法能够达到最优值。

在ONCBT算法中,首先编码重传各终端中具有最高重要性的丢包,然后各终端利用重传包组合进行译码,这种特点决定了此算法缺乏自适应性,译码率不是很高,造成冗余重发。DBRA算法在编码决策上具有更多灵活性,在接收即可译码的基础上获得不错的自适应增益。

2.2 时延分析

由DBRA算法的编码原则和编码步骤可知,此算法满足终端重要性高的丢包编码优先重传,满足终端对时间特别敏感的数据包实时性需求。如果每次重传成功接收,则终端都能够及时译码出所需数据包,除少量计算延时外,没有译码延时,因此在相同的重传效率下,新算法能够获得更优的时延性能。由于新算法保持着较好的重传效率,所以总的来说,新算法具有较好的低时延性能。

3 仿真分析

仿真采用如图1所示的广播结构,源节点S向M个终端发送N个数据包,每个数据包长度相同,每次向所有终端广播发送一个数据包,广播时间间隔设为1s。仿真采用的丢包信道模型分为3类:终端丢包率不相关信道模型,终端丢包率相关信道模型和连续丢包信道模型。仿真比较以下算法的性能:1)传统的存储转发机制的传输算法,记为SF算法;2)文献[9]中提出的算法,记为NCWBR算法;3)文献[10]中提出的算法,记为ONCBT算法;4)本文所提算法,记为DBRA算法。

3.1 丢包不相关信道模型下算法性能比较

丢包率不相关模型是指各终端之间丢包率不具有相关性。仿真条件为终端数M=5,数据包数N=30,丢包率变化范围为0.05~0.5,变化步长为0.05。图5为各算法平均重传次数

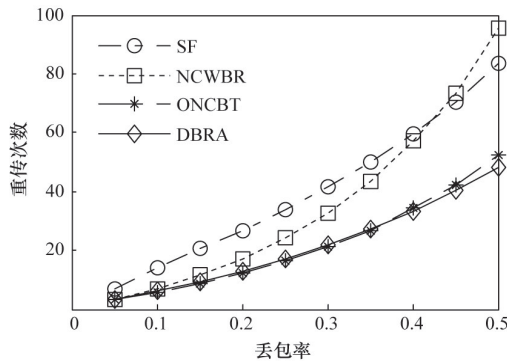


图5 丢包不相关时各算法重传效率

Fig. 5 Algorithm efficiency with irrelevant packet loss

随着丢包率变化趋势,由图5可知,DBRA相比SF和NCWBR重传次数大大减小,重传时延大大降低。在丢包率小于0.4的情况下,ONCBT的重传效率略微比DBRA好,这是由于在低丢包率的情况下,ONCBT通过多个重传包译码出丢包,一定程度上提高了重传效率,但是在丢包率大约0.4时,DBRA的重传效率好于ONCBT,而且随着丢包率增大,DBRA的优越性越来越明显。这是由于随着丢包率升高,ONCBT由多重传包译码出丢包的概率降低,而DBRA不受此影响,所以仍然保持着较好的性能。由图6可以看出在丢包率大于0.3的情况下,DBRA的重传延时开始小于ONCBT算法,可见在等等的传输效率下,DBRA延时要小。这是因为DBRA能够在每次重传时都能及时得到丢包,而ONCBT有时需要通过多个组合重传包才能够译出丢包,相比ONCBT算法,DBRA少了译码时延。

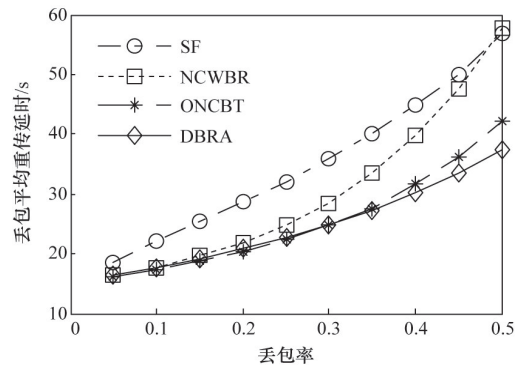


图6 丢包不相关时各算法丢包重传延时

Fig. 6 Algorithm delay with irrelevant packet loss

图7和图8是在数据包数N=30,各终端丢包率为0.4,终端数M变化范围为2~11时,各算法随着终端数变化所需要的平均重传次数和丢包平均延时趋势图,分别反映了各算法的重传效率和延时特性。由图7可以看出,随着终端数目增加,平均重传次数增加,当终端数小于6时,SF效率最低,其次是NCWBR,ONCBT和DBRA都保持着较好的重传效率,DBRA

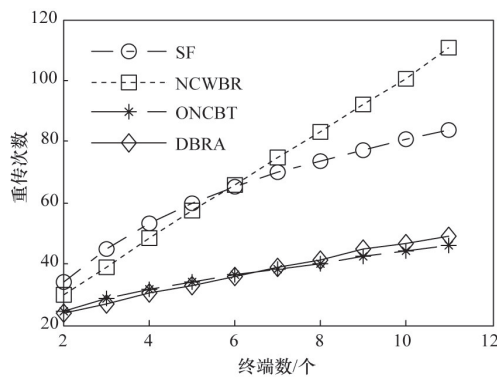


图7 丢包率P=0.4,N=30时各算法随终端数变化的重传效率

Fig. 7 Algorithm efficiency changing with the number of terminals (P=0.4, N=30)

略优。当终端数大于6时,SF算法好于NCWBR,ONCBT好于DBRA,且随着终端数的增加,越来越明显。由图8反映的延时特性可知,相比ONCBT算法,DBRA一直保持着较好的优势。总的分析可知,对于较小的终端数M,DBRA保持着较好的性能。

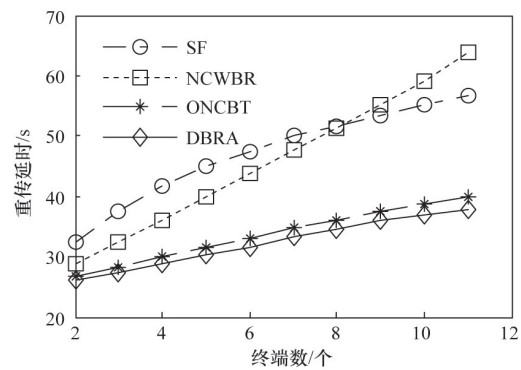


图8 丢包率P=0.4,N=30时各算法随终端数变化的重传延时

Fig. 8 Algorithm delay changing with the number of terminals (P=0.4, N=30)

3.2 丢包相关信道模型下算法性能比较

丢包相关模型是指各终端的丢包率之间存在相互关系。假设终端 T_i ($1 < i < M$) 的丢包率与前面 $i-1$ 个终端相关, 相关表达式为 $p_i = [r_y N_y + r_N (i-1 - N_y)] / (i-1)$, 其中 $i=2, 3, \dots, M$, p_i 表示终端 T_i 的丢包率, r_y 表示发生丢包的相关系数, r_N 表示未发生丢包的相关系数, N_y 表示前 $i-1$ 个终端未收到数据包终端数。本次实验中选取 $r_y=0.8$, $r_N=0.1$, 丢包率变化范围为 $[0.05, 0.5]$, 变化步长为 0.05, 仿真结果如图 9 和图 10 所示。由图 9 可以看出, 在丢包率相关的

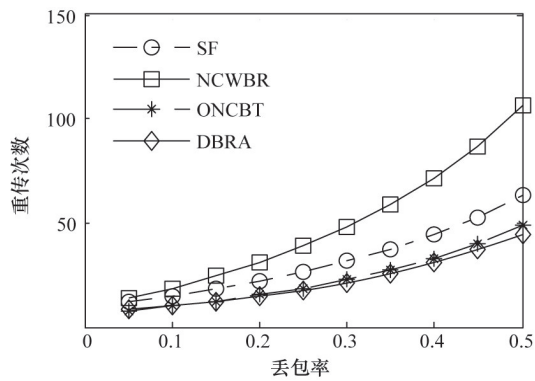


图 9 终端丢包率相关时各算法重传效率

Fig. 9 Algorithm efficiency with relevant packet loss

情况下, 由于 NCWBR 的译码率大大降低, 增加了重传次数, 性能最差, 其次是 SF; DBRA 的性能要优于 ONCBT, 并且随着丢包率的增加, 优势越来越明显。这是由于在丢包相关的情况下, ONCBT 的译码率降低, 而新算法不受此影响, 同时较好的组合策略, 使得新算法获得了很好的性能。从图 10 可以看出, 在丢包率相关的情况下, DBRA 相比其他算法具有更小的时延, 而且随着丢包率的增大, 优势越来越明显。可见, 在无线广播中, 如果各链路之间具有相关的信道特征时, DBRA 相比其他算法具有更优的性能。

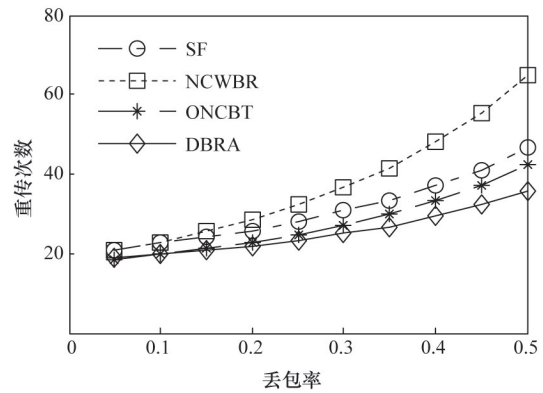


图 10 终端丢包率相关时各算法丢包重传延时

Fig. 10 Algorithm delay with relevant packet loss

3.3 连续丢包信道模型下算法性能比较

连续丢包模型是指遇到突发错误, 发生连续丢包的可能性较大。本次仿真中, 可能连续丢包 1~5 个, 发生概率相同。

图 11 为连续丢包模型下各算法平均重传次数随着丢包率变化趋势图。从图 11 可以看出, 在丢包率小于 0.2 左右时, SF 重传效率最差, 当丢包率大于 0.2 时, 随着丢包率增加, NCWBR 算法的译码率大大降低, 重传次数大大增加。当丢包率小于 0.3 左右时, DBRA 和 ONCBT 的性能接近, 新算法性能略差, 但当丢包率大于 0.3 时, 随着丢包率的增加, 新算法性能占优且表现越来越明显。

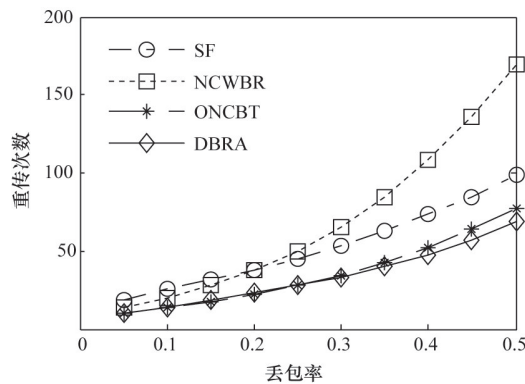


图 11 连续丢包时各算法重传效率

Fig. 11 Algorithm efficiency with continuous packet loss

图 12 为连续丢包模型下各算法丢包重传延时大小随着丢包率变化的趋势图。从图 12 可以看出, 性能较差的是 SF

和 NCWBR, DBRA 性能最好, 而且随着丢包率增大, 性能较 ONCBT 越来越好, 而 ONCBT 算法由于连续误码的存在, 使得译码延时增加, 影响整体性能。

可见, 在无线广播中, 在突发错误信道下, DBRA 相比其他算法具有更好的适应性。

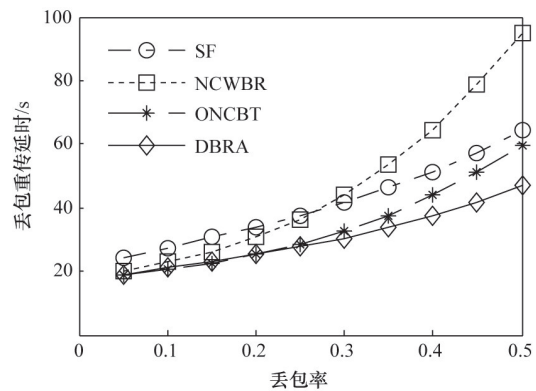


图 12 连续丢包时各算法丢包重传延时

Fig. 12 Algorithm delay with continuous packet loss

4 结论

通过分析传统的无线广播重传算法, 提出了一种能够优先重传重要数据包的广播重传算法, 该算法优先编码重要性较高的丢包, 并且保证重要性高的丢包的快速译码同时, 合理选择其他丢包进行编码重传, 提高了数据传输的效率和时

延特性。仿真表明,该算法在各类信道条件下都具有较好性能,相比其他算法更突出了重要丢包能够及时获得的优点,而且保持着较好的重传效率,容易实现。该算法可推广到多跳网络中,具有较好的实用性。可见该算法是一种较优的单跳无线网络数据包广播策略,更加适用于对时延敏感的应用。

参考文献(References)

- [1] Ahlswede R, Cai N, Li S Y R., et al. Network information flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216.
- [2] Ho T, Koetter R, Medard M, Karger D, et al. The benefits of coding over routing in a randomized setting[C]// IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT 2004), Chicago, IL, USA. 27 June-2 July, 2004.
- [3] Ho T, Medard M, Koetter D, et al. A random linear network coding approach to multicast[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(10): 4413-4430.
- [4] Nguyen D, Tran T, Nguyen T, et al. Wireless broadcast using network coding[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(2): 914-925.
- [5] Francesco R, Chiti F, Tassi A. An efficient network coding scheme with symbol combining: performance evaluation, optimization, and comparisons[J]. IEEE Transactions on vehicular technology, 2013, 62(3): 1267-1275.
- [6] Katti S, Rahul H, Hu W, et al. XORs in the air: practical wireless network coding[J]. IEEE/ACM Transactions On Networking, 2008, 16(3): 497-510.
- [7] 卢冀,肖嵩,吴成柯.一种基于机会式网络编码的高效广播重传方法[J].电子与信息学报,2011,33(4):858-863.
Lu Ji, Xiao Song, Wu Chengke. A high efficiency retransmission approach based on opportunistic network coding[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(4): 858-863.
- [8] 戴彬,曹志刚,杨军,等.基于匹配理论的无线广播编码重传算法[J].软件学报,2011,22(11):2833-2842.
Dai Bin, Cao Zhigang, Yang Jun, et al. Coded retransmission algorithm based on matching theory for wireless broadcasting[J]. Journal of Software, 2011, 22(11): 2833-2842.
- [9] 肖嵩,王伟平,杨路明,等.基于网络编码的无线网络广播重传方法[J].通信学报,2009,30(9):69-75.
Xiao Xiao, Wang Weiping, Yang Luming, et al. Wireless broadcasting retransmission approach based on network coding[J]. Journal on Communication, 2009, 30(9): 69-75.
- [10] 卢冀,肖嵩,吴成柯.基于机会式网络编码的低时延广播传输算法[J].电子学报,2011,39(5):1214-1219.
Lu Ji, Xiao Song, Wu Chengke. Opportunistic network coding based delay-sensitive broadcast transmission algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(5): 1214-1219.
- [11] Li L, Ramjee R, Buddhikot M, et al. Network coding-based broadcast in mobile ad hoc networks[C]// INFOCOM 2007, 26th IEEE International Conference on Computer Communications, Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Anchorage, Alaska, USA, 6-12 May 2007.

(责任编辑 侯澄芝,马宇红)

·学术动态·



公众爱看的10部科普影片投票产生

公众投票产生的“公众爱看的10部科普影片”是《大师——谢希德》、《趣味科技大赛》、《“绿色”牛粪是个宝》、《生物武器灭白蛾》、《天象奇观日全食》、《自然之谜——地震》、《非常科学——对折的纸》、《深海危机》、《山野小植物》、《鲟鱼繁殖新技术》。

2013年5月,中国科协科普部启动了“公众喜爱的科普作品”推介活动。其中“公众喜爱的科普作品——优秀科普影视作品”活动共征集到190部科普影视作品,由专家评选出46部优秀科普影视推荐作品。

2014年1月17日至2月14日,这46部优秀科普影视作品在新浪网“公众喜爱的科普作品”专题页面上线,接受公众投票,截至2月14日投票人数达10.7万人次。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35473/n35518/15438586.html>。