

可靠多播方案的最佳有效负载长度研究

祝峰¹, 武玲霜², 谷源涛¹

(1. 清华大学 电子工程系, 北京 100084; 2. 中国电子设备系统工程公司, 北京 100039)

摘 要: 以保证可靠分发所需总传输时间为评判标准, 在考虑分组头开销的条件下, 研究了基于简单反馈重传、RS 码 (Reed-Solomon code) 和 LT 喷泉码技术的 3 种多播方案中的有效负载长度选取问题, 提出了通过理论分析确定最佳有效负载长度的方法, 并以仿真实验进行验证。理论分析和仿真实验表明, 对于不同的分组头大小和链路误比特率, 各方案的有效负载长度均具有最佳取值; 链路误比特率越高, 最佳有效负载长度所带来的性能增益越明显。其中, 基于 LT 喷泉码的可靠多播方案性能最优。

关键词: 数据分发; 可靠多播; 最佳有效负载长度; 喷泉码; RS 码

中图分类号: TN92

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2011)06-0101-06

Optimal payload lengths of reliable multicast schemes

ZHU Feng¹, WU Ling-shuang², GU Yuan-tao¹

(1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. China Electronic Equipment Systems Engineering Corporation, Beijing 100039, China)

Abstract: Using total transmission time—the time needed to guarantee reliable data dissemination -- as judgment criterion, the payload length selection problem was investigated for three multicast solutions which are based on simple feedback retransmission, Reed-Solomon codes, and LT fountain codes, respectively, with the consideration of packet overhead. A theoretical analysis method was proposed to determine the optimal payload lengths, which was verified by simulations. Analyses and simulations indicate, for variable packet overhead sizes and link bit error rates, each method considered has its optimal payload length. As link bit error rate increases, the performance gain brought by the selection of optimal payload lengths becomes more significant. Among the three solutions, the reliable multicast solution based on LT fountain codes has the most outstanding performance.

Key words: data dissemination; reliable multicast; optimal payload length; fountain codes; Reed-Solomon codes

1 引言

在数据分发业务中, 采用多播技术可以有效节省所占用的网络资源, 如带宽、服务器端的运算开销和存储空间等。对于报文分发和软件更新下载等应用, 必须保证数据传输的正确性和完整性, 因此,

需要研究可靠多播问题。点对点传输中, 解决可靠性问题的基本技术包括自动重传请求 (ARQ, automatic repeat request)、前向纠错 (FEC, forward erasure correction) 以及两者结合而成的混合 ARQ。这 3 种技术应用于多播时各具有优势和不足。ARQ 可以有效保证传输的可靠性, 但在客户数量较多时

收稿日期: 2010-01-27; 修回日期: 2010-12-01

基金项目: 国家自然科学基金联合资助重点项目 (U0835003); 国家自然科学基金资助项目 (60872087)

Foundation Items: The Key Program of the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (U0835003); The National Natural Science Foundation of China (60872087)

容易引起反馈内爆,造成网络拥塞^[1]; FEC 虽然不需要客户反馈,但其具体实现方式带有一定的信道参数依赖性和盲目性;混合 ARQ 兼具 ARQ 与 FEC 技术的优点,但相应地也有更高的实现复杂度。总体来说,以 3 种技术为基础的可靠多播方案在不同的应用场景中均能发挥各自的功效。

传统的可靠多播方案,如 XTP^[2]、SRM^[3]、RMTP^[4]等^[5~7],通过将以上技术与不同的分组丢失侦测和恢复机制相结合,以实现可靠性和效率的统一。近年来,许多新兴技术,如网络编码,被应用于可靠多播方案的设计,在保证传输可靠性的前提下,尽可能提高效率^[8]。其中,可用为保证所有客户可靠接收,服务器所需传输时间作为衡量协议效率的标准^[9]。

影响可靠多播方案性能的主要参数包括:多播客户数量,最差客户分组丢失率,客户平均分组丢失率等^[9]。因此,有必要研究参数设定问题,尤其是分组丢失概率相关参数,如每个数据分组所携带的有效负载长度。若不考虑分组头开销,数据分组的有效负载长度等于其分组长。在这种情况下,文献[10]对 LT 喷泉码的分组长选取问题做了仿真,但只限于点对点情况。文献[11]研究了基于不同 FEC 的可靠多播解决方案,通过理论分析和仿真实验得到了为达到最高成功传输概率所应选取的分组长。由于未与 ARQ 技术结合,所考察的几种多播方案不能完全保证数据的可靠分发。同时,由于未考虑分组头开销,文献[10]与文献[11]均得出分组长应尽可能小的结论(虽然也提及考虑分组头开销时分组长不能任意小,但未做进一步分析与说明)。

若考虑分组头开销,有效负载长度过小会引起带宽有效利用率下降,降低协议效率。因此,在考虑分组头开销的前提下,本文对包含了 FEC、ARQ 以及混合 ARQ 技术的 3 种应用于删除信道的可靠多播方案进行研究,考察每个数据分组所携带的有效负载长度对方案性能的影响并对其最佳取值进行了分析与探讨,提出了通过理论分析确定最佳有效负载长度的方法,并以仿真实验进行验证。同时也对这几种不同的可靠多播方案的性能进行了比较。

2 问题描述

删除信道具有以下性质:若数据分组中任一位数据发生错误,均认为接收失败,而将整个分组丢

弃。在删除信道中,为保证接收正确,必须用可靠多播技术进行多客户的文件分发。假设待分发文件大小为 F byte,数据分组的分组头大小为 a byte,有效负载长度为 L byte,链路误比特率为 e ,则分组丢失概率 $q = 1 - (1 - e)^{8(L+a)}$ 。文件拆分成的原始数据分组的数量为 $K = \lceil F/L \rceil$ 。设多播客户数量为 N ,服务器端可用速率为 B byte/s。

本文研究的 3 种可靠多播方案分别基于:简单反馈重传、分块 RS 码编码和分块 LT 喷泉码^[12]编码。衡量上述方案性能的标准为总传输时间,即所有客户均能正确接收并恢复原文件条件下,服务器端所花费的传输时间。除了数据分发过程本身消耗的时间外,总传输时间还包括反馈过程消耗的时间,即客户向服务器发送反馈信息以及服务器端的等待和响应时间。无论对于 3 种可靠多播方案中的哪一种,反馈过程仅存在于每一轮数据分发的收尾阶段,其传输的反馈数据量远远少于多播分发的数据量,且服务器端只需要对接收到的反馈信息做一些基本处理即可进行下一轮或下一个数据分块的编码及分发。因此,与数据分发过程本身消耗的时间相比,反馈过程消耗的时间可以忽略不计。所以在计算总传输时间时,只考虑数据分发过程本身消耗的时间,而忽略客户反馈信息以及服务器端的等待和响应时间,因此总传输时间取决于服务器发送数据分组总数。

后文将首先推导各方案中服务器发送数据分组总数的表达式,再将其映射为总传输时间,继而得到每种方案的最佳有效负载长度。受篇幅所限,在不影响理解的前提下,将略去大部分公式推导过程。

3 3 种多播方案及其发送数据分组总数

3.1 基于简单反馈重传的可靠多播方案

这是一种应用 ARQ 技术保证可靠性的多播方案。首先,服务器将 K 个原始数据分组以多播方式分发,称为第一轮传输。第一轮传输完成后,若有客户发现未能收全所有数据分组,则将缺失的数据分组序号反馈给服务器。服务器收集到所有客户的分组丢失情况,求其并集,再以多播方式进行重传,称为第二轮传输。依此类推,直至所有客户均正确接收全整个文件。此方案需要每个客户对每个原始数据分组都至少成功接收一次,否则无法保证可靠接收。

若经过 $g-1$ 轮传输, 某客户仍未收到某一数据分组, 此客户将要求服务器在第 g 轮传输中对此数据分组进行重传, 其概率为 $P_g^{(1)} = q^{g-1}$ 。考虑到有 N 个用户, 某一数据分组在第 g 轮传输中仍需被重传的概率为

$$1 - (1 - P_g^{(1)})^N$$

设服务器在第 g 轮传输中所需分发的数据分组数量为 $S(g)$, 其期望为

$$E\{S(g)\} = K(1 - (1 - P_g^{(1)})^N)$$

为保证可靠接收, 服务器共需要分发的数据分组总数 C 的期望为

$$E\{C\} = \sum_{g=1}^{\infty} E\{S(g)\} = K \sum_{g=1}^{\infty} (1 - (1 - P_g^{(1)})^N)$$

3.2 基于分块 RS 码编码的可靠多播方案

这是一种应用混合 ARQ 技术保证可靠性的多播方案。首先, K 个原始数据分组被分为多个编码分块, 每个分块包括 k 个原始数据分组以及由这 k 个分组生成的 w 个冗余校验分组, 共 $n=k+w$ 个编码分组, 用户只要收到其中任意 k 个编码分组 (无论其中原始数据分组和冗余校验分组的比例如何), 即可通过译码成功恢复此分块中的全部原始数据分组。

对于一个编码分块, 数据分组的反馈及重传过程与方案一类似, 只不过客户只有在成功接收到的相异编码分组数量 h 小于 k 时, 才将所缺失的数据分组序号反馈给服务器; 若 $k \leq h < n$, 虽然仍有分组丢失, 但客户已成功译码, 则无需要求服务器继续重传。在这种方案下, 每个客户对每个编码分块都至少成功接收到 k 个相异的编码分组, 才能保证可靠接收。

下面计算某一客户要求在第 g 轮传输中对某一编码分组进行重传的概率 $P_g^{(2)}$ 。

首先, 对于此客户, 经过 $g-1$ 轮传输, 仍未收到某一编码分组概率为 q^{g-1} , 至少收到一次的概率为 $1 - q^{g-1}$ 。而要求在第 g 轮传输中对某一编码分组进行重传, 等价于此客户经过 $g-1$ 轮传输, 成功接收到的相异编码分组数量 h 小于 k , 且接收到的 h 个相异编码分组中不包括此编码分组。因此, 有:

$$P_g^{(2)} = \sum_{h=0}^{k-1} P(\text{经过 } g-1 \text{ 轮传输, 收到 } h \text{ 个}$$

相异编码分组, 且不包括某一编码分组)

$$\begin{aligned} &= \sum_{h=0}^{k-1} P(\text{经过 } g-1 \text{ 轮传输, 在除某一编码分组} \\ &\text{之外的 } n-1 \text{ 个相异编码分组中收到 } h \text{ 个}) \\ &= \sum_{h=0}^{k-1} C_{n-1}^h (1 - q^{g-1})^h (q^{g-1})^{n-h} \end{aligned}$$

考虑到有 N 个用户, 某一数据分组在第 g 轮传输中仍需被重传的概率为

$$1 - (1 - P_g^{(2)})^N$$

因此对于一个编码分块, 服务器在第 g 轮传输中所需分发的数据分组数量 $S(g)$ 的期望为

$$E\{S(g)\} = n(1 - (1 - P_g^{(2)})^N)$$

因为整个文件共被划分为 $\lceil K/k \rceil$ 个编码分块, 服务器共需分发的数据分组总数 C 的期望为

$$E\{C\} = \lceil K/k \rceil \sum_{g=1}^{\infty} E\{S(g)\} = n \lceil K/k \rceil \sum_{g=1}^{\infty} (1 - (1 - P_g^{(2)})^N)$$

3.3 基于分块 LT 喷泉码编码的可靠多播方案

这是一种主要应用 FEC 技术保证可靠性的多播方案。首先, 将原始文件划分为多个分块, 再对每个分块应用 LT 喷泉码进行编码。设每个分块由 M 个分组构成, 每个分组的大小为 J byte, 则原始文件共被划分为 $\lceil F/(MJ) \rceil$ 个分块。

对于一个分块, LT 编码器可由 M 个原始分组生成无穷多的编码分组, 客户只要收到其中任意 $M(1+\epsilon)$ 个编码分组, 即可通过译码以很高的概率成功恢复此分块中的全部原始分组, 其中 ϵ 表示译码开销。对于足够大的 ϵ 和译码成功率, 可近似认为一旦收到 $M(1+\epsilon)$ 个编码分组就必然能够成功解码, 而 $M(1+\epsilon)$ 个编码分组对应的编码分组数量为

$$Q_{M,\epsilon} = \left\lceil \frac{M(1+\epsilon)J}{L} \right\rceil$$

因此, 这种方案下需要每个客户对每个分块都至少成功接收到 $Q_{M,\epsilon}$ 个编码分组, 才能保证可靠接收。

设对于一个分块, 服务器分发 R 个编码分组能保证可靠分发, 即所有客户均至少接收到 $Q_{M,\epsilon}$ 个编码分组。对于 $r \geq Q_{M,\epsilon}$, 有:

$$\Pr(r) = P\{R \leq r\} = \left(\sum_{f=Q_{M,\epsilon}}^r C_r^f p^f q^{r-f} \right)^N$$

设 $\Pr(Q_{M,\epsilon} - 1) = 0$, 即对于 $r \geq Q_{M,\epsilon}$, 有:

$$P\{R = r\} = \Pr(r) - \Pr(r-1)$$

因此，为保证可靠分发，服务器共需要分发的数据分组总数 C 的期望为

$$E\{C\} = \lceil F/(MJ) \rceil \sum_{r=Q_{M,e}}^{\infty} rP\{R=r\}$$

4 最佳有效负载长度

4.1 总传输时间

上节已经求得 3 种多播方案为保证可靠分发所需发送的数据分组总数的期望 $E\{C\}$ 。根据之前假设，数据分组头大小为 a byte，服务器端可用速率为 B byte/s，则总传输时间 T 的期望为

$$E\{T\} = E\left\{\frac{L+a}{B}C\right\} = \frac{L+a}{B}E\{C\}$$

4.2 最佳有效负载长度

一般情况下，分组头大小取决于协议和网络规模等应用场景，不能随意改变。但有效负载长度可以任意调整以达到最佳系统性能。直观思考：一方面，增加数据分组中的有效负载会引起数据分组大小的增加，继而在链路误比特率一定的情况下，提高分组丢失概率；另一方面，减少数据分组中的有效负载会增加分组头数据在数据分组中所占的比例，相当于增加分组头开销，浪费带宽。

由表达式分析，将 $E\{T\}$ 重写为

$$E\{T\} = \frac{1}{B} \left(1 + \frac{a}{L}\right) [E\{C\}L]$$

注意增大 L 将增加分组丢失概率，服务器必须增加所发有效负载数据的总量，即 $E\{C\}L$ 增大，而 $(1+a/L)$ 又是 L 的单调减函数，因此 $E\{T\}$ 不具有单调性。所以，3 种可靠多播方案，都存在相应的最佳有效负载长度 L_{opt} ，使得可靠分发所需的总传输时间最小。此结论将在下一节仿真实验中得到验证。

5 仿真实验

首先，用蒙特卡洛方法分别对 3 种可靠多播方案在不同链路误比特率下进行仿真，以验证理论分析的正确性。实验环境设置为：文件大小 $F=15$ Mbyte，客户数 $N=10$ ，服务器端可用速率 $B=10$ kbyte/s。链路误比特率 e 选择适当的值，满足分组长为 250byte 时的分组丢失概率 q_{250} 依次为 5%，10%，15%，...，50%。数据分组头大小 a 固定为 40byte，对应于 TCP/IP 协议的分组头长度。

5.1 方案 1：基于简单反馈重传的可靠多播方案

在不同的链路误比特率下，总传输时间 T 与数

据分组有效负载长度 L 的关系如图 1 所示。其中，极限值对应链路误比特率 $e=0$ 的情况。仿真值和理论值的 10 条曲线分别对应于 10 种链路误比特率。从图中可以看出，仿真值和理论值几乎重合，验证了理论分析的正确性。

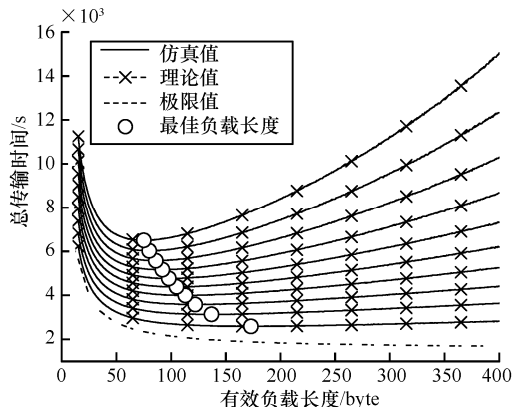


图 1 方案 1 总传输时间 T 与有效负载长度 L 的关系

由图 1 可见，最佳有效负载长度随链路误比特率的增加而减小，这是因为链路误比特率越大，增加有效负载长度引起的分组丢失概率增大所带来的负面影响越大。对于选定的实验参数，最佳有效负载长度在 75~173 byte 之间变化，属于实际应用中的合理范围之内。

另一方面，随着链路误比特率的增加，总传输时间随有效负载长度变化的动态范围逐渐变大，即选取最佳有效负载长度所带来的性能增益变大。这说明对于链路误比特率较高的环境，选取最佳有效负载长度非常有意义。

5.2 方案 2：基于分块 RS 码编码的可靠多播方案

实验中采用 $k=57, n=63$ 的 (63,57) RS 码。在不同的链路误比特率下，总传输时间 T 与数据分组有效负载长度 L 的关系如图 2 所示。

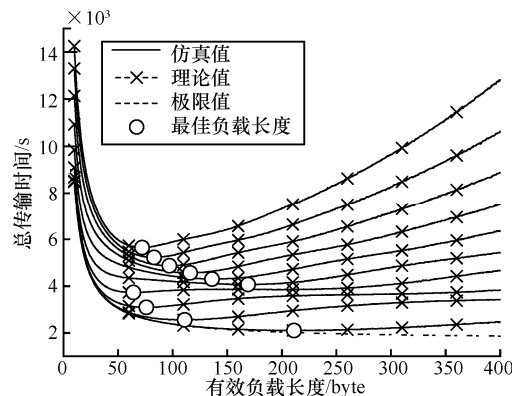


图 2 方案 2 总传输时间 T 与有效负载长度 L 的关系

图中各曲线及标注的意义与上节相同，且仿真值与理论值也几乎重合。对于选定的实验参数，最佳有效负载长度约在 64~211byte 之间变化，属于实际应用中的合理范围之内。

对于方案 2，最佳有效负载长度与链路误比特率的关系并不具有单调性。为了进一步观察二者的关系，图 3 中显示了 q_{250} 依次为 2%，4%，6%，…，80% 时，由仿真值推得的最佳有效负载长度分布趋势。可以看出，随着 q_{250} 的增加，最佳有效负载长度分布趋势出现了数次明显的跳变，但仍可近似看作分段单调。实际上，与方案 1 类似，对于方案 2，有效负载长度会影响到分组丢失概率、分组头开销比例等参数，但由于方案 2 相对复杂，总传输时间与有效负载长度的映射关系具有更复杂的形式。

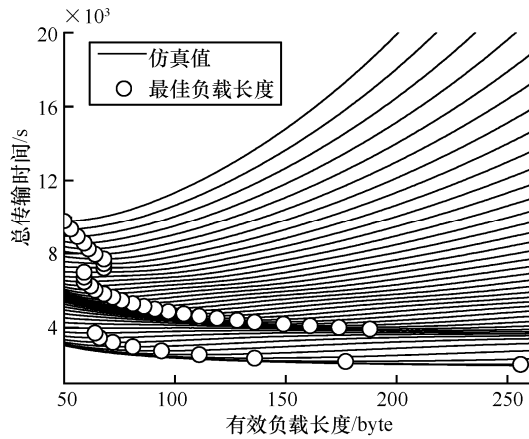


图 3 方案 2 最佳有效负载长度分布趋势

此外，总传输时间变化的动态范围同样与链路误比特率呈正相关，因此，对于本方案，在链路误比特率较高的环境中选取最佳有效负载长度也是很有意义的。

5.3 方案 3：基于分块 LT 喷泉码的可靠多播方案

实验中分组大小 $S=2\text{byte}$ ，每个分块的分组数 $M=10\ 000$ 。实测可得，对于 $M=10\ 000$ ，当译码开销 $\varepsilon \approx 5\%$ 时，LT 喷泉码可达到 98% 以上的解码成功率。因此，在理论计算中，以对一个分块接收到 $M(1+\varepsilon)$ 个编码分组作为客户能够成功解码的标准。

在不同的链路误比特率下，总传输时间 T 与数据分组有效负载长度 L 的关系如图 4 所示。

图中各曲线及标注的意义与上两小节相同。可以看出，方案 3 具有与方案 1 相同的结论，即最佳有效负载长度随链路误比特率的增加而减

小；总传输时间变化的动态范围与链路误比特率正相关。

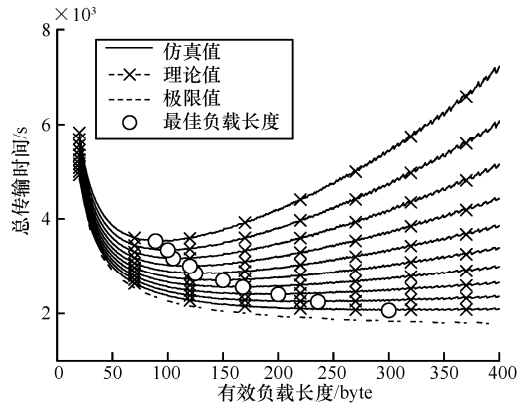


图 4 方案 3 总传输时间 T 与有效负载长度 L 的关系

对于选定的实验参数，最佳有效负载长度约在 89~300byte 之间变化，属于实际应用中的合理范围之内。

5.4 3 种方案的性能比较

在本节中，考察 q_{250} 分别为 5% 和 50% 时，3 种方案的最佳有效负载长度、最短总传输时间随分组头大小 a 变化的趋势。其中，最短总传输时间即指最佳有效负载长度所对应的总传输时间。

最佳有效负载长度与分组头大小 a 的关系如图 5 所示。可见，从总体上来讲，方案 3 需要将有效负载长度设置得更高。但链路误比特率较高时，3 种方案的最佳有效负载长度相差不多。

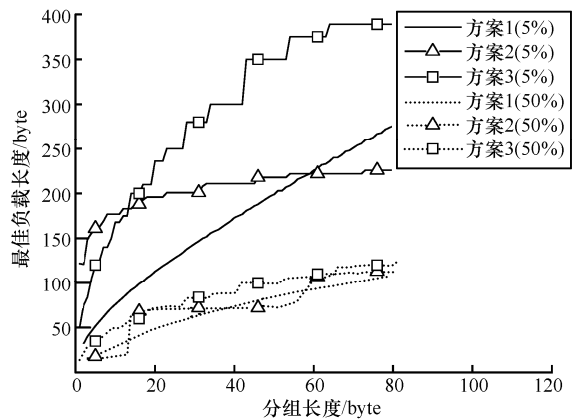


图 5 最佳有效负载长度与包头大小 a 的关系

最短总传输时间与分组头大小 a 的关系如图 6 所示。可见，若考虑最短总传输时间，方案 3 优于方案 2，又优于方案 1。而且随着链路误比特率增加，方案 3 的优势明显增大，而方案 2 与方案 1 的性能趋于一致。

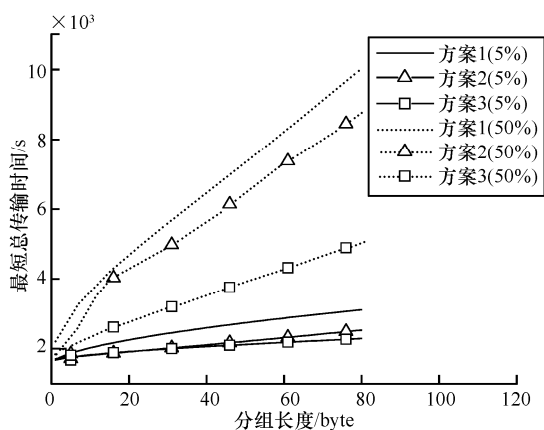


图 6 最短总传输时间与包头大小 a 的关系

6 结束语

在数据分发业务中，存在多种基于不同机制的可靠多播方案，用以保证数据传输的正确性和完整性。无论对于哪种可靠多播方案，每个数据分组所携带的有效负载长度的选取均是影响方案总体性能的重要因素。因此，本文在考虑分组头开销的情况下，以保证可靠分发所需的总传输时间为评判标准，研究了 3 种重要的可靠多播方案中数据分组的最佳有效负载长度问题，提出了通过理论分析确定最佳有效负载长度的方法，并通过仿真实验验证了理论分析的正确性。

理论分析与仿真实验表明，在不同的分组头大小与链路误比特率情况下，本文所涉及的 3 种方案均具有最佳有效负载长度。对于方案 1 和方案 3，随着链路误比特率的增加，最佳有效负载长度逐渐减小；对于方案 2，这种关系近似以分段单调的形式呈现。同时，无论对于哪种方案，总传输时间随有效负载长度变化的动态范围随链路误比特率的增加而增大，因此，链路误比特率越高，最佳有效负载长度所带来的性能增益越明显，正确选取有效负载长度的意义也就越大。另外，从 3 种方案的横向比较来看，由于 LT 喷泉码的有效抗分组丢失性能，方案 3 所需的总传输时间最短，性能和效率最高。

在实际的可靠分发应用中，利用本文提出的思路和方法，根据具体的参数来选取数据分组的最佳有效负载长度，可以显著减少网络中需要传输的数据量，节约数据传输时间，继而起到有效节省带宽、能源等资源开销的作用，在同样的资源消耗下可以支持更多的并发客户和并发业务。

参考文献:

- [1] 赵东升,卢锡城,周兴铭.FEC 和 ARQ 技术在可靠点-多点传输中的传输代价分析和比较[J].通信学报, 1999,20(增刊):363-367.
ZHAO D S, LU X C, ZHOU X M. Transmission cost analysis and comparison of FEC and ARQ techniques in reliable multicast transmission[J]. Journal on Communications,1999,20(Sup):363-367.
- [2] STRAYER W, DEMPSEY B, WEAVER A. XTP—the Xpress Transfer Protocol[M]. New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1992.
- [3] FLOYD S, JACOBSON V, LIU C, *et al.* A reliable multicast framework for light-weight sessions and application level framing[J]. IEEE/ACM ToN, 1997, 5(6):784-803.
- [4] PAUL S, SABNANI K. Reliable multicast transport protocol (RMTP)[J]. IEEE Journal of Selected Areas in Communication, Special Issue on Network Support for Multipoint Communications, 1997, 15(3):407-421.
- [5] CHOURISHI D, SESHADRI S, CHOURISHI D. Dynamic hybrid active reliable multicast (DHARM)[A]. ICC SIT'09[C]. Dresden, Germany, 2009. 629-634.
- [6] KOUTSONIKOLAS D, HU Y, WANG C. Pacifier: high-throughput, reliable multicast without crying babies in wireless mesh networks[A]. INFOCOM'09[C]. Brazil, 2009. 2473-2481.
- [7] SRINIVAS V, LU R. An efficient reliable multicast protocol for 802.11-based wireless LANs[A]. WowMom'09[C]. Kos, Greece, 2009. 1-6.
- [8] ZHAN C, XU Y, WANG J, *et al.* Reliable multicast in wireless networks using network coding[A]. MASS'09[C]. Macau SAR, China, 2009. 506-515.
- [9] PAN Y, WANG H, LI G, *et al.* An analysis of the main factors on the performance of reliable multicast[A]. ICME'02[C]. 2002. 25-28.
- [10] VUKOBRATOVIC D, DESPOTOVIC M. On the packet lengths of rateless codes[A]. EUROCON'05[C]. Belgrade, Serbia, 2005. 672-675.
- [11] 姜博,曹志刚,晏坚.PLFEC 可靠多播解决方案分组长度研究[J].清华大学学报(自然科学版), 2008,48(4):567-570.
JIANG B, CAO Z, YAN J. Packet lengths of PLFEC-based reliable multicast solutions[J]. J Tsinghua Univ(Sci and Tech), 2008,48(4): 567-570.
- [12] LUBY M. LT codes[A]. FOCS'02[C]. Vancouver, Canada, 2002. 271-280.

作者简介:



祝峰 (1987-), 男, 山东泗水人, 清华大学博士生, 主要研究方向为无线通信网协议与系统以及信道编码技术等。

武玲霜 (1963-), 女, 河北正定人, 中国电子设备系统工程公司高级工程师, 主要研究方向为无线自组织网和通信终端技术。

谷源涛 (1976-), 男, 河北保定人, 清华大学副教授, 主要研究方向为无线通信网络和数字信号处理等。