水声通信中一种有效的停等自动重传请求方案

高明生[1], 谢 宏[1], 薄 华[1], 陆佶人[2]
(1. 上海海事大学电子工程系, 上海 200135; 2.东南大学无线电工程系, 南京 210096)

摘要: 针对水声信道, 提出了一种改进的停等自动重传请求(stop-and-wait automatic repeat request, 简称 SW ARQ)方案。为了提高传输的可靠性, 分组中的每个比特连续传输 N 次。对所提方案的理论上所得到的吞吐量关于信道的比特信噪比(SNR)、分组长度、每个比特连续传输的次数以及信道传输速率与信道传播时延之积进行了优化, 较之于文献中所提及适合水声信道的基本 SW ARQ 及其改进方案, 所提出的 ARQ 方案能显著地提高水声通信系统的吞吐性能。而且, 随着比特信噪比的增大, 最优的 N 对分组长度、信道传输速率与信道传播时延之积的敏感度大大地降低。

关键词: 水声信道; SW ARQ; 吞吐量
中图分类号: TN914.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-3630(2008)-01-0115-04

An efficient stop-and-wait ARQ scheme over underwater acoustic channels

GAO Ming-sheng[1], XIE Hong[1], BO Hua[1], LU Ji-ren[2]
(1. Department of Electronic Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China;
2. Department of Radio Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: An improved stop-and-wait automatic repeat request (SW ARQ) scheme over underwater acoustic channels is proposed. In the proposed ARQ scheme, each bit in a packet is repeated N times consecutively to increase transmission reliability. The throughput, theoretically derived for the proposed scheme, is optimized with respect to the bit signal to noise ratio (SNR), the packet length, the number of copies transmitted consecutively per bit and the product of the channel transmission rate and propagation time. Compared to basic and modified versions of SW ARQ scheme described in the literatures, the proposed scheme can improve throughput performance of underwater acoustic communications systems markedly. Moreover, with an increase in SNR, the sensitivity of the optimum N to both the packet length and the product of the channel transmission rate and propagation time can greatly be reduced.
Key words: underwater acoustic channels; SW ARQ; throughput

1 引 言

水声通信技术已被广泛应用于导航、水下检测、海洋资源调查和海洋物理研究等方面。然而, 水声信道, 特别是浅海水声信道, 是一种随机时-空-频变、强多径干扰、强环境噪声、传播时延长、可用带宽非常有限的信道。同时, 由于水声通信系统是半双工的, 其用于传输过程中的差错控制技术一般采用传统的性能最差的停等自动重传请求(Stop-and-Wait Automatic Repeat Request, SW ARQ)协议(本文称之为基本的 SW ARQ 协议), 由此导致水声通信系统的性能急剧下降[1]。

类似于水声半双工通信系统, 为提高卫星通信系统中 SW ARQ 协议的吞吐性能, 很多学者提出了改进的 SW ARQ 方案。M.Schwatz[2]提出了依据

收稿日期: 2006-12-01; 修回日期: 2007-03-26
基金项目: 上海市教委项目资助(06FZ023)
作者简介: 高明生(1967-), 男, 江苏人, 博士, 研究方向: 无线 Ad Hoc、Senor 网络、水声通信网络。
通讯作者: 高明生, E-mail: msgao@cie.shmtu.edu.cn

信道的传播时延、误码率而优化分组数据长度的方法，从而提高了系统的吞吐量。J.M.Morris[3]利用连续 ARQ 的思想方法[4]，在发送端每次发送一组分组数据（而非基本的 SW ARQ 中每次一个分组数据），在接收端每次对一组分组数据中每一个分别进行确认（Acknowledgement, ACK）响应或非确认（Negative Acknowledgement, NACK）响应，并以一组的响应结果反馈给发送端，进而来提高系统的吞吐量。对于水声通信系统，M.Stojanovic[5]将系统的吞吐量看作是收发双方的距离、信道的传输速率、信道的误码率和分组长度等参数的函数，并在某些参数确定的情况下对其它参数进行了优化，以此尽可能地改善了系统的吞吐性能。

本文从编码的角度，基于一定的调制和解调方法，提出了对分组中的每一个比特都连续传输若干次而大大提高了系统传输可靠性的一种新的 SW ARQ 方案。仿真结果表明，本文所提的 SW ARQ 方案能非常有效地提高水声通信系统的吞吐性能。

2 SW ARQ 协议模型

为方便起见，本文首先假设如下：1）系统采用 BPSK 调制和相干解调；2）采用基于 HDLC（高速数据链路控制协议）帧格式，每个分组的长度为 n 比特，每个分组所含控制位的比特数为 n_h，每个 ACK（或 NACK）的长度为 n_{ack} 比特；3）信道的传输速率为 R 比特/秒（bps）；4）收发双方的传播时延为 T_p 秒（收发双方的距离除以声速）；5）比特信噪比为 γ_bdB；6）ACK（或 NACK）的传输无差错；7）数据的处理时间和收/发转换时间忽略不计。

另外，类似于文献[5]，本文定义系统的吞吐量为一个分组信息位的传输时间与正确传输一个分组所需的平均时间之比。

2.1 基本的 SW ARQ 协议

在一个基本 SW ARQ 通信系统中，发送端每次向接收端发送一个分组，然后等待接收端对该分组的响应。由于可能会受到信道噪声的干扰，该分组数据到达接收端时可能产生错误。接收端收到该分组数据后，依据一定的校验算法，判断该分组是否正确。若正确，则给发送端响应 ACK 消息；否则给发送端响应 NACK 消息。对发送端而言，若收到 ACK 消息，则发送下一个分组；否则重新发送该分组，直到收到该分组的正确响应 ACK 消息为止。

显然，信道的比特误码率为[6]

$$p_b=\frac{1}{2}\mathrm{erfc}(\sqrt{\gamma_b}) \tag{1}$$

分组正确接收的概率为

$$p_c=(1-p_b)^n \tag{2}$$

发送端自发送一个分组到收到该分组响应的总时间为

$$T_w=2\frac{n}{R}+\frac{n_{ack}}{R}+2T_p \tag{3}$$

一个分组被正确传输的平均时间为

$$T_1=\sum_{k=1}^{\infty}p_c(1-p_c)^{k-1}kT_w=\frac{T_w}{p_c} \tag{4}$$

则其吞吐量为

$$\eta_{sw}=\frac{(n-n_h)/R}{T_1}=(1-p_b)^n\cdot\frac{n-n_h}{(2n+n_{ack})+2RT_p} \tag{5}$$

当信道的误码率较高，且信道的传播时延又特别大时，由（5）不难看出，基本的 SW ARQ 的吞吐性能非常低，这在卫星和水声信道中表现得尤为突出。

2.2 改进的 SW ARQ 协议

M.Schwatz 提出了依据信道误码率的变化而优化分组数据长度的方法，从而提高了系统的吞吐量。其不足之处在于没有充分考虑信道的传播时延。J.M.Morris 利用连续 ARQ 的思想方法，在发送端每次发送一组分组数据（而非基本的 SW ARQ 中每次一个分组数据），在接收端每次对一组分组数据中每一个分别进行 ACK 响应或 NACK 响应，并以一组的响应结果反馈给发送端，进而来提高系统的吞吐量。

为方便起见，本文假定 J.M.Morris 提出的 SW ARQ 为 M-SW ARQ，每组的分组个数为 K。同样可以得到 M-SW ARQ 的吞吐量为

$$\eta_{m\text{-}sw}=(1-p_b)^n\cdot\frac{K(n-n_h)}{K(2n+n_{ack})+2RT_p} \tag{6}$$

由式（6），显然还可以得到

$$\lim_{K\to\infty}\eta_{m\text{-}sw}=(1-p_b)^n\cdot\frac{n-n_h}{2n+n_{ack}} \tag{7}$$

针对水声通信系统中存在的类似问题，M. Stojanovic 将系统的吞吐量看作是收发双方的距离、信道的传输速率、信道的误码率和分组长度等参数的函数，并在某些参数确定的情况下对其它参数进行了优化，以此尽可能地改善系统的吞吐性能。

但是，无论是 J.M.Morris 提出的以组传输的方案还是因此 M.Stojanovic 经过优化的方法，由(7)可知，要充分地提高系统的吞吐量，需要接收端有足够的内存空间，这也是这些方法不尽人意之处。

3　一种新的 SW ARQ 协议

为了有效地降低水声信道的误码率，本文从编码的角度，基于 BPSK 调制和相干解调，对分组中的每一个比特都连续传输 N 次（相应地称本文的 SW ARQ为 N-SW ARQ），则信道的比特误码率为[6]

$$p_e=\frac{1}{2}\mathrm{erfc}(\sqrt{N\gamma_b}) \tag{8}$$

本质上，(8)意味着每个比特的能量扩大了 N 倍。

类似于基本的 SW ARQ，容易得到本文所提 N-SW ARQ 的吞吐量为

$$\eta_{N\text{-}sw}=(1-p_e)^n\cdot\frac{n-n_h}{N(2n+n_{ack})+2RT_p}$$

$$=(1-\frac{1}{2}\mathrm{erfc}(\sqrt{N\gamma_b}))^n\cdot\frac{n-n_h}{N(2n+n_{ack})+2RT_p} \tag{9}$$

由(5)、(6)和(9)不难看出，SW ARQ 的吞吐量是比特信噪比 γ_b、分组长度 n(n_h 和 n_{ack} 通常是固定的)、信道传输速率与传播时延的积 RT_p 的函数(对于 M-SW ARQ 还与每组的分组个数 K 有关，而对于 N-SW ARQ 还与比特连续传输次数 N 有关)。通常情况下，积 RT_p 能够在分组传输之前被确定，而且在一定的比特信噪比 γ_b 条件下，依据使吞吐量最大化的原则可得到最优的分组长度 n。

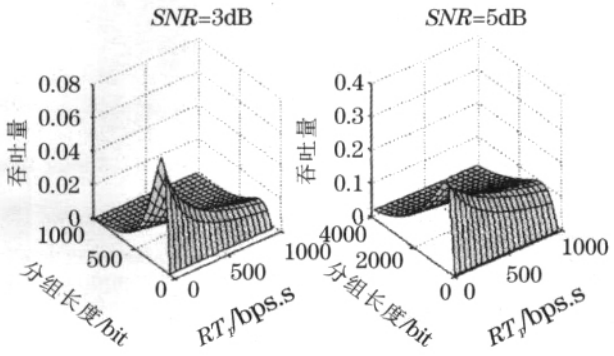

图 1　基本 SW ARQ 最优分组长度 n 随积 RT_n 的变化曲线
(左图 γ_b=3dB，右图 γ_b=5dB)
Fig.1　The optimal packet length versus RT_n for basic SW ARQ
(with γ_b=3dB and γ_b=5dB respectively)

图 1 是基本 SW ARQ 系统在比特信噪比 γ_b 分别为 3dB 和 5dB 条件下最优分组长度 n 随积 RT_p 变化的曲线(其中 n_h=72 比特，n_{ack}=80 比特)。

图 2 是 N-SW ARQ 系统在比特连续传输次数，比特信噪比分别为 2dB 和 3dB 的条件下最优分组长度 随积 变化的曲线。

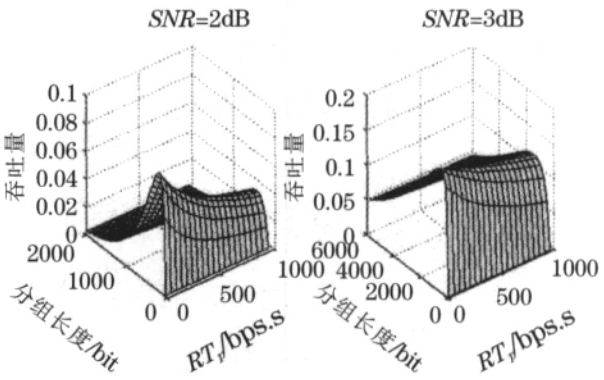

图 2　N-SW ARQ 最优分组长度 n 随积 RT_n 的变化曲线
(左图 γ_b=2dB，右图 γ_b=3dB)
Fig.2　The optimal packet length versus RT_n for N-SW ARQ
(with γ_b=2dB and γ_b=3dB respectively)

4　吞吐性能的分析和比较

假定 SW ARQ 通信系统的传输速率 R 的变化范围为 1kbps~10kbps，收发双方距离的变化范围为 1km~5km。为了比较几种 SW ARQ 的吞吐性能，仍然假设 n_h=72 比特，n_{ack}=80 比特，N=2，同时定义基本的 SW ARQ 为 Basic SW ARQ。

图 3 是在信道比特信噪比 γ_b=2dB，信道传输速率与传播时延的积 RT_p=4096bps.s 条件下 Basic SW ARQ、M-SW ARQ 和 N-SW ARQ 协议的吞吐量随分组长度变化的曲线。从中可以看出：(1) Basic SW ARQ 和 M-SW ARQ 系统吞吐量的峰值出现在分组长度 n=120 比特附近，而 N-SW ARQ 系统吞吐量的峰值出现在分组长度 n=400 比特附近；(2) Basic SW ARQ 系统的吞吐性能最差，而 N-SW ARQ 系统的吞吐性能远优于其它两种。

图 4 则是在信道比特信噪比 γ_b=3dB，信道传输速率与传播时延的积 RT_p=4096bps.s 条件下 Basic SW ARQ、M-SW ARQ 和 N-SW ARQ 协议的吞吐量随分组长度变化的曲线。同样可以看出：(1) Basic SW ARQ 和 M-SW ARQ 系统吞吐量的峰值出现在分组长度 n=200 比特附近，而 N-SW ARQ 系统吞吐量的峰值出现在分组长度 n=2000 比特附近；(2) Basic SW ARQ 系统的吞吐性能最差，而 N-SW ARQ 系统的吞吐性能仍然远优于其它两种。

从图 3 和图 4 还可以看出，当信道传输速率与传播时延的积 RT_p 确定的情况下，SW ARQ 系统最优的分组长度 n 对 γ_b 的变化是相当敏感的。

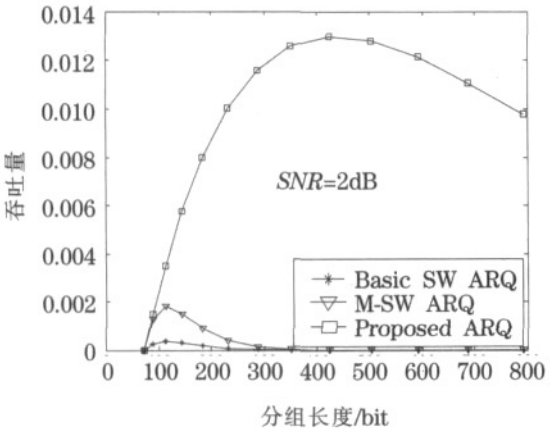

图 3 几种 SW ARQ 的吞吐量 η 随分组长度 n 的变化曲线

Fig.3 Throughput versus packet length n for several SW ARQs

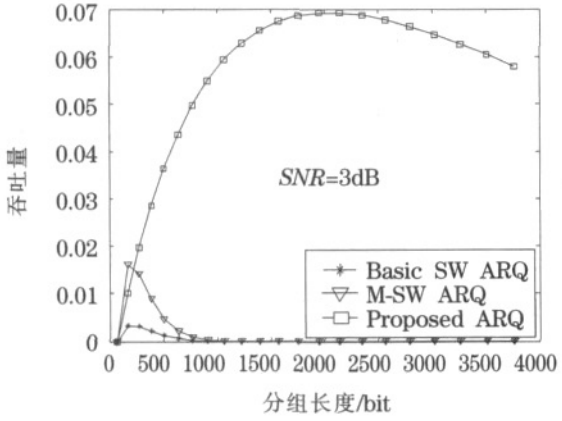

图 4 几种 SW ARQ 的吞吐量 η 随分组长度 n 的变化曲线

Fig.4 Throughput versus packet length n for several SW ARQs

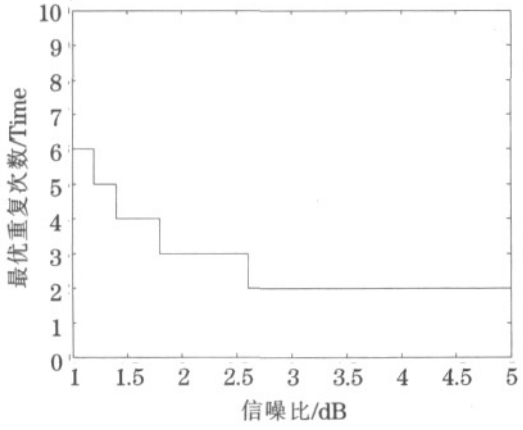

图 5 N-SW ARQ 中最优连续传输次数 N 随比特信噪比 γ_b 的变化曲线

Fig.5 Optimum values of N versus γ_b in N-SW ARQ scheme

图 5 是在 n_h=72 比特，n_{ack}=80 比特，优化的分组长度 n=200 比特，RT_p=4096bps.s 条件下，依据使 (9) 式最大化的原则，最优的比特连续传输次数 N 随信道的比特信噪比 γ_b 变化的曲线。

由图 5 不难发现，当比特信噪比 $\gamma_b \geq 2.6$dB 时，最优的 N 的值为 2，即最优重复次数 N 随着比特信噪比的增大，其对分组长度和信道传输速率与传播时延之积的敏感度显著地降低了。

5 结 论

本文为提高系统传输的可靠性，基于 BPSK 的调制和相干解调方法，对分组中的每一个比特连续传输若干次而不是一次传输一组分组数据，并依据当前信道的比特信噪比和信道传输速率与传播时延的积来确定最优的分组长度和最优的比特连续传输次数，且无须接收端增加额外内存空间，提出了一种新的 SW ARQ 方案。仿真结果表明，本文所提的 SW ARQ 方案能非常有效地提高水声通信系统的吞吐性能，并且最优的比特连续传输次数随着比特信噪比的增大而对分组长度、信道传输速率与传播时延之积的敏感度大大地降低，易于在工程上的实现。

考虑时变信道信噪比的变化以及依据不同的信道传输速率与传播时延之积，如何自适应地选择最优的分组长度以提高水声通信系统的性能将是本文下一步的研究方向。

参 考 文 献

[1] Ian F. Akyildiz, Dario Pompili and Tommaso Melodia. Challenges for efficient communication in underwater acoustic sensor networks[J]. ACM Sigbed Review, July 2004, 1(2).

[2] M Schwartz. Telecommunication Networks[M]. Adison Wesley, 1988.

[3] Morris J M. Optimal blocklengths for ARQ error control schemes[J]. IEEE Trans. Commun., 1979, 27(2): 488-493.

[4] S Lin, etl. Automatic-repeat-request error control schemes [J]. IEEE Commun. Mag., 1984, 22(12): 5-17.

[5] M Stojanovic, J G Proakis, J A Rice, M D Green. Optimization of a Data Link Protocol for an Underwater Acoustic Channel[C]. Proc. of IEEE Ocean Europe, 2005, 2(1): 68-73.

[6] Proakis J G. Digital Communications. 3rd ed[M]. New York: McGraw-Hill, 1995.