

水声传感器网络数据可靠传输协议 IPool-ADELIN 的研究

蔡绍滨¹,高振国²,姚念民¹

(1. 哈尔滨工程大学计算机学院, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: ADELIN (ADaptive rELiable traNsport protocol)协议利用冗余传输节点来增强了水声传感器网络数据传输的可靠性.下游节点实际上已经接到冗余节点转发的绝大多数数据包.本文提出了基于 IPool(Improved Pool)节点的 IPool-ADELIN 协议.通过监听节点的数据传输,IPool 节点不但能够在链路状态较差时进行链路维护,而且能够只转发没有被数据包暗示响应的数据包.数学分析和仿真结果表明,和 ADELIN 协议相比,IPool-ADELIN 协议具有更高的数据到达率和更低的数据传输能耗.

关键词: 水声传感器网络; 数据传输; 可靠性; IPool 节点

中图分类号: TP302.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 08-1937-04

IPool-ADELIN Protocol for Reliable Transport in Underwater Acoustic Sensor Networks

CAI Shao-bin¹, GAO Zhen-guo², YAO Nian-min¹

(1. Computer Department, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

2. Automation Department, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: In ADELIN (ADaptive rELiable traNsport protocol), a redundancy forwarding node is used to improve the reliability of data transmission. The downstream node has already received most of the relayed data packets of the redundant node. IPool-ADELIN protocol based on IPool (Improved Pool) node is proposed. By overhearing the data packet transmissions, IPool node not only does local link maintenance when the BER (Bit Error Rate) of a link is high, but also relays the data packets, which are not implicitly acknowledged by data packets. The results of mathematic analysis and simulations show that, compared with ADELIN, IPool-ADELIN has higher data delivery ratio and lower energy consumptions.

Key words: underwater acoustic sensor network; data transport; reliability; IPool node

1 引言

水声传感器网络是由各种水下传感器节点组成的自组织网络.和陆上无线信道相比,水声信道具有带宽小、传输错误率高、时延长和能耗大等特点.因此,水声传感器网络数据可靠传输协议的研究非常具有挑战性.人们通常利用反馈或冗余技术来进行数据传输可靠性研究^[1~5].

ADELIN(ADaptive rELiable traNsport)协议^[5]是一个基于冗余技术的水声传感器网络数据可靠传输协议.根据节点间的距离,ADELIN 协议采用如下的编码方式来保证数据的可靠传输:

(1)当节点距离小于 θ_1 时, ADELIN 协议使用 BCH (Bose, Ray-Chaudhuri, Hocquenghem)码对数据包进行编码(算法 1).

(2)当节点间距离位于 θ_1 和 θ_2 之间时, ADELIN 协

议首先使用 EC(Erasure Codes) 码对数据包进行编码,然后再使用 BCH 码对数据包进行编码(算法 2).

(3)当节点间距离大约 θ_2 时,它先使用 EC 码来编码数据包,然后再使用 BCH 码来编码数据包和校验包(算法 3).

在复杂场景中,利用水声通信的广播特性, ADELIN 协议通过冗余传输节点转发数据来进一步增加数据传输的可靠性.但是,这种方式浪费了水声传感器网络有限的能源和带宽.

2 IPool-ADELIN 协议

在 Pool 节点技术的研究基础上^[6],我们定义 IPool (Improved Pool)节点来实现数据监听、数据有选择转发和链路局部自动维护,并在此基础上提出了 IPool-ADELIN 协议来改进 ADELIN 协议.图 2 举例说明了 IPool-ADELIN 协议是如何在图 1 所描述的复杂场景中工作的.

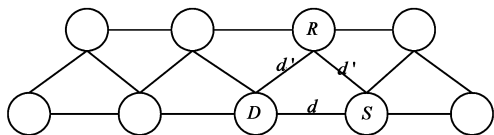


图1 一个简单的复杂场景

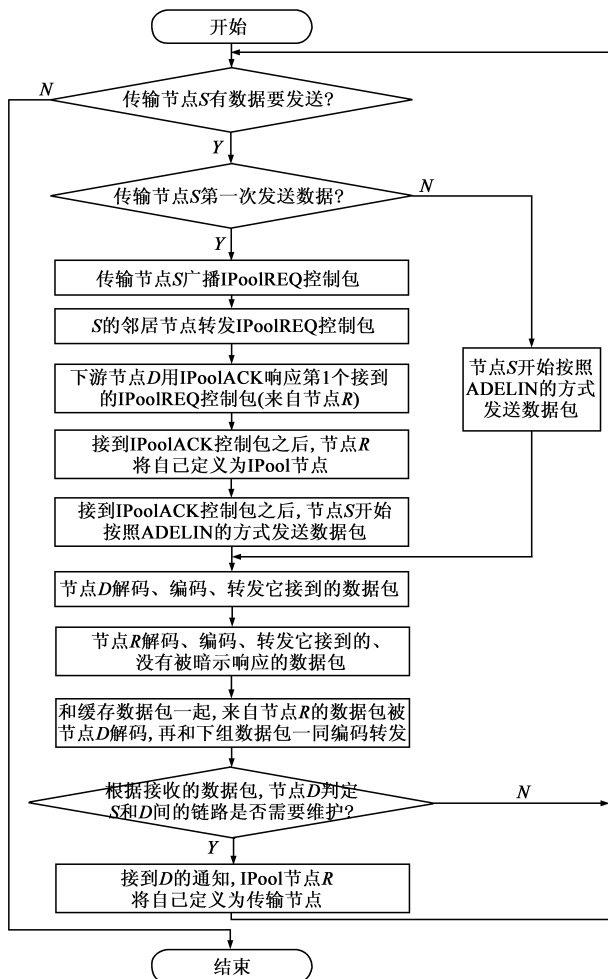


图2 IPOOL-ADELIN算法流程

因此,在IPool-ADELIN协议中,节点R转发了它接到的、节点D没有接到的数据包。并且,节点D能够在链路状态很差的时候进行局部链路维护。因此,和ADELIN相比,IPool-ADELIN不但具有较高的数据成功传输概率,而且具有较低的数据传输能耗。

3 能量消耗的数学分析

在文献[5]定义的水声传感器网络信道模型的基础上,本文比较分析了ADELIN协议和IPool-ADELIN协议在复杂场景中的数据传输能耗。

当一个长度为 l 的数据包在距离为 d 的两个节点间进行1跳传输时,它的成功概率为 $p(l, d)$ 。当 k 个长度为 l 的数据包在两个节点间利用ADELIN协议的算法1、2或3进行1跳传输时,它们的成功概率 p_1, p_2 或 p_3 分别为^[5]:

$$p_1(l, d) = p_{BCH}^k(l, t, d) \quad (1)$$

$$p_2(l, d) = p_{EC}(k, s, d, p_D, p_C) \quad (2)$$

$$p_3(l, d) = p_{EC}(k, s, d, p_D, p_C) \quad (3)$$

在式(1)中, t 为BCH编码的参数;在式(2)中, $p_C = p(1 - \phi, d)$ (ϕ 是BCH编码的费用), $p_D = p_{BCH}(l, t, d)$;在式(3)中, $p_D = p_C = p_{BCH}(l, t, d)$ 。

对于商业水听器,节点发送数据的能耗为 $E_t(l) = P_t \times l/r \times 10^{-3} \text{ J}$,节点接收数据的能耗 $E_r(l) = 0.2 \times E_t(l)$ 。其中, P_t 是信号进行圆柱扩散传播时到达距源节点1m处具有强度 I_t 所需的能量; $r = f^*(d) \text{ Kb/s}$ 是信道可得的传输速率; $f^*(d)$ 是节点间数据传输的最佳频率,和节点间的距离成反比。

在没有任何传输校验码的条件下,长度为 l 的数据包在两个节点间进行简单数据传输时,它的能耗由以下两个部分组成:(1)节点S发送数据的能量消耗为 $E_t(l)$;(2)节点D接到 $p(l, d)$ 个数据包的能量消耗 $p(l, d)E_r(l)$ 。因此, k 个长度为 l 的数据包在两个节点间进行简单数据传输时,ADELIN协议的算法1、2或3的能量消耗分别为:

$$E_1 = k \{ E_t(l) + [E_r(l) + E_{dec}(l, t)]p(l, d) \} \quad (4)$$

$$E_2 = k \{ E_t(l) + [E_r(l) + E_{dec}(l, t)]p(l, d) + s[E_t(l - \phi) + E_r(l - \phi)p(l, d)] \} \quad (5)$$

$$E_3 = (k + s) \{ E_t(l) + [E_r(l) + E_{dec}(l, t)]p(l, d) \} \quad (6)$$

在上式中, $E_{dec}(l, t)$ 为解码的能量消耗。

在复杂场景中,在没有任何传输校验码的条件下,长度为 l 的数据包在两个传输节点间传输时,ADELIN协议和IPool-ADELIN协议的数据传输能耗主要由以下几个部分组成:

(1)节点S发送数据的能量消耗 $E_t(l)$;

(2)节点S的4个邻居节点接到 $2[p(l, d) + p(l, d')]$ 个数据包的能量消耗 $2[p(l, d) + p(l, d')]E_r(l)$;

(3)在ADELIN协议中,节点R转发接到的 $p(l, d')$ 个数据包的能量消耗 $p(l, d')E_r(l)$;在IPool-ADELIN协议中,节点R仅转发 $p^2(l, d')[1 - p(1, d)]$ 个数据包,它的能量消耗为 $p(l, d')^2[1 - p(1, d)]E_r(l)$;

(4)在ADELIN协议中,节点R的4个邻居节点接到 $2p(l, d')[p(l, d) + p(l, d')]$ 个数据包的能量消耗 $2p(l, d')[p(l, d) + p(l, d')]E_r(l)$;在IPool-ADELIN协议中,节点R的4个邻居节点接到 $2p^2(l, d')[1 - p(1, d)][p(l, d) + p(l, d')]$ 个数据包的能量消耗 $2p^2(l, d')[1 - p(1, d)] \times [p(l, d) + p(l, d')]E_r(l)$ 。

因此,IPool-ADELIN协议和ADELIN协议的能量消耗比率为

$$R = \{1 + \frac{r}{r'} p^2(l, d') [1 - p(l, d)]\} / [1 + \frac{r}{r'} p(l, d')] \quad (7)$$

在式(7)中, r 和 r' 分别为数据在距离为 l 和 l' 的节点间进行传输时的带宽^[5]. 和数据传输的能量消耗相比, 数据解码的能量消耗很小. 因此, 在忽略解码能量消耗的前提下, 两种协议只使用 BCH 编码时的数据传输能量消耗比率为:

$$R_{BCH} = \{1 + \frac{r}{r'} p_{BCH}^2(l, t, d') [1 - p_{BCH}(l, t, d)]\} / [1 + \frac{r}{r'} p_{BCH}(l, t, d')] \quad (8)$$

因此, 在复杂场景中, 在忽略解码能量消耗的前提下, IPool-ADELIN 协议和 ADELIN 协议的算法 1, 2 和 3 在 10 跳范围内传输 k 个包的能量消耗比率分别为:

$$R_1 = R_{BCH} \quad (9)$$

$$R_2^{ADELIN} = \{1 + \frac{r}{r'} p_2^2(l, d') [1 - p_2(l, d)]\} / [1 + \frac{r}{r'} p_2(l, d')] \quad (10)$$

$$R_3 = [1 + \frac{r}{r'} p_3^2(l, d') (1 - p_3(l, d))] / [1 + \frac{r}{r'} p_3(l, d')] \quad (11)$$

在复杂场景中, ADELIN 协议的算法 i 在 n 跳范围内传输 k 个数据包的能量消耗为:

$$E_{i, tot}^{ADELIN}(n) = [np_i^n + \sum_{j=0}^{n-1} (j+1)p_i^j(1-p_i)] E_i^{ADELIN} \quad (12)$$

同理, 在复杂场景中, IPool-ADELIN 协议的算法 i 在 n 跳范围内传输 k 个数据包的能量消耗为:

$$E_{i, tot}^{IPool}(n) = [(n-1) + \sum_{j=0}^{n-1} (j+1)p_i^j(1-p_i)] E_i^{IPool} + E_i^{ADELIN} p_i^n \quad (13)$$

因此, 在复杂场景中, 忽略 IPool-ADELIN 协议最后一跳数据传输的能量消耗不同, 两种协议的算法 i 在 n 跳范围内传输 k 个数据包的能量消耗比率约为 R_i .

以上的分析结果表明, 算法的数据包成功传输概率决定两个协议各个算法的能量消耗比率. 在水声传感器网络中, 节点间的距离是决定信道质量的主要因素, 所以节点间的距离也就是决定两种协议各个算法的能量消耗比率的主要因素.

为了分析协议的数据传输能耗, 我们首先定义了复杂场景中的水声传感器网络的一些参数: (1) $d' = d/\sqrt{2}$; (2) BCH 编码参数 $m = 10, t = 2$; (3) 数据包的长度 $l = 1023$; (4) EC 编码采用 4 个数据包和 3 个检验包的方式; (5) EC 编码的费用 $\phi = 20$; (6) 声源级 $SL = 118\text{dB}$.

图 3 描述了 IPool-ADELIN 协议和 ADELIN 协议的 3

种算法在复杂场景中 10 跳数据传输时的能量消耗比率. 在图 3 中, 我们可以看到距离对能量消耗比率的影响. 总体来讲, 由于 IPool 节点转发了较少的数据包, 所以 IPool-ADELIN 协议的 3 种算法的能量消耗都低于 ADELIN 协议 3 种算法的能量消耗. 当节点间距离较小时, 算法 1, 2 和 3 都具有很高的可靠性, IPool-ADELIN 协议的 3 种算法的 IPool 节点都转发很少的数据包. 因此, 它们的能量消耗比率都很低, 约为 54.3%. 当节点间距离增大的时候, 算法 1 和 2 的可靠性随着距离的增大而下降, 它们的能量消耗比率上升; 算法 3 的可靠性高, 节点间距离的变化对它的能量消耗比率的影响很小. 当节点间距离为 5km 时, 算法 1 的能量消耗比率约为 93.3%, 算法 2 的能量消耗比率约为 81.3%, 算法 3 的能量消耗比率约为 61%.

图 3 能量消耗比率的数学分析

4 仿真分析

在分析水声信道模型的基础上, 我们利用 GloMoSim^[7] 仿真软件建立了如下的水声传感器网络数据传输仿真环境: (1) 200 个节点在 $500\text{km} \times 500\text{km}$ 的区域内随机分布; (2) 节点随水流运动; (3) 环境噪音为 $(1 \pm 2\%) \text{NL}$; (4) 节点间的数据传输带宽为 $f^*(d) \text{kb/s}$; (5) 每种仿真运行 500 次.

图 4(a)、(b) 和 (c) 比较分析了 ADELIN 协议和 IPool-ADELIN 协议的 3 种算法在进行 10 跳数据传输时的数据到达率. 在图 4 中, M-Scheme 表示数学分析的结果, A-Scheme 表示 ADELIN 协议的仿真分析结果, I-Scheme 表示 IPool-ADELIN 协议的仿真分析结果. 从图中

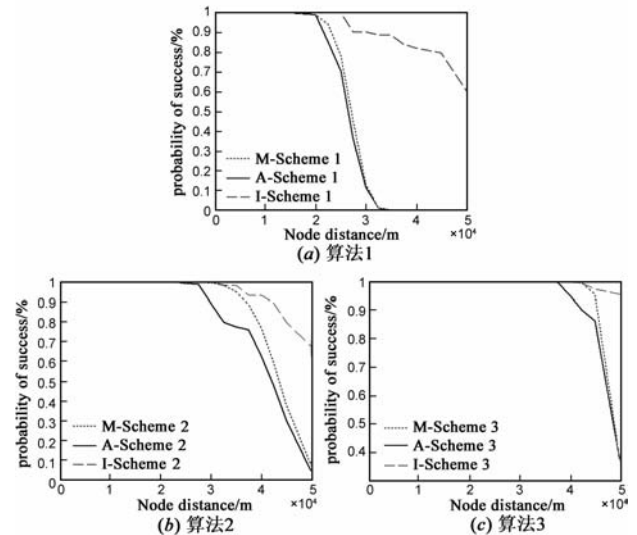


图 4 数据到达率比较分析

我们可以看到,由于具有链路维护功能,能够在链路状态不佳时进行局部链路维护,IPool-ADELIN 协议的仿真结果优于数学分析结果.相比而言,ADELIN 协议无法在链路状态较差时进行链路局部维护.因此,当节点运动导致链路 BER 增大时,协议的数据到达率下降.因此,ADELIN 协议仿真结果的数据到达率低于理论分析的数据到达率.

图 5(a)和图 5(b)比较了 IPool-ADELIN 协议 3 种算法能量消耗的数学分析结果和仿真结果.在 5 图中,M-scheme 表示数学分析的结果,S-scheme 表示仿真的结果.从图中我们可以看到,仿真的结果和数学分析的结果十分相近.在进行 10 跳数据传输时,1 跳传输产生的误差会被累计.因此,在进行 10 跳数据传输时,数学分析结果和仿真结果之间的误差较大.但是,这些误差仍然在合理的范围之内.仿真结果进一步证明了数学分析的结果.

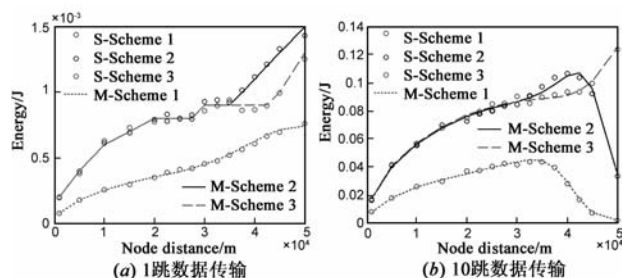


图5 能量消耗的比较分析

5 结论

在以往研究 Pool 节点技术的基础上,本文定义 IPool 节点,并在此基础上提出了 IPool-ADELIN 协议来改进 ADELIN 协议.在 IPool-ADELIN 协议中,IPool 节点监听下游节点的数据传输,作为从上游节点接到数据包的暗示响应,并只转发没有响应的数据包.此外,IPool 节点能够在原有链路状态较差的时候进行局部链路维护,增强了链路的稳定性.数学分析和仿真结果表明,和 ADELIN 协议相比,IPool-ADELIN 协议不但具有更高的数据传输可靠性而且具有更低的数据传输能耗.

参考文献

- [1] 王斌,刘增基,李红滨,张冰.基于 ACK 和 NAK 的可靠组播传输协议的性能分析和比较[J].电子学报,2001,29(10):1314-1318.
Wang Bin, Liu Zengji, Li Hongbin, Zhang Bing. Performance analysis and comparison of reliable multicast transport protocol based on ACK and NAK[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(10):1314-1318. (in Chinese)

- [2] 宋震,周贤伟,林亮.链路可靠的无线传感器网络组播路由协议[J].电子学报,2008,36(1):64-69.
Song Zhen, Zhou Xianwei, Lin Liang. Reliable link multicast routing protocol for wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(1):64-69. (in Chinese)
- [3] H-P Tan, W K G Seah, L Doyle. A multi-hop arq protocol for underwater acoustic networks[A]. Proc OCEANS'07[C]. Aberdeen, Scotland; IEEE Press, 2007. 1-6.
- [4] P Xie, J-H Cui. An fec-based reliable data transport protocol for underwater sensor networks[A]. Proc ICCCN'07[C]. Honolulu, HI, USA; IEEE Press, 2007. 747-753.
- [5] Bin Liu, Florent Garcin, Fengyuan Ren, Chuang Lin. A study of forward error correction schemes for reliable transport in underwater sensor networks[A]. Proc SECON'08[C]. San Francisco, California, USA; IEEE Press, 2008. 197-205.
- [6] Shaobin Cai, Nianmin Yao, Nianbin Wang. Multipath passive data acknowledgement on-demand multicast protocol[J]. Computer Communications, 2007, 29(11):2074-2083.
- [7] Lokesh Bajaj, Mineo Takai, Rajat Ahuja, Ken Tang, Rajive Bagrodia, Mario Gerla. GloMoSim: A Scalable Network Simulation Environment[R]. Los Angeles: UCLA, 1997.

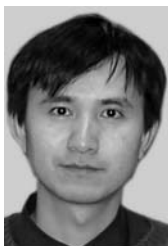
作者简介



蔡绍滨 男,1973 年出生,博士,哈尔滨工程大学计算机学院教授.主要研究方向为无线自组网和无线传感器网络.
E-mail: caishaobin@hrbeu.edu.cn



高振国 男,1976 年出生,博士,哈尔滨工程大学自动化学院教授,计算机协会会员.主要研究方向为无线传感器网络.
E-mail: gag@hrbeu.edu.cn



姚念民 男,1974 年出生,博士,哈尔滨工程大学计算机学院教授.主要研究方向为网络存储和无线传感器网络.
E-mail: yaonianmin@hrbeu.edu.cn