

水声传感器网络中一种基于多种群萤火虫的路由协议

徐 明^{1,2} 刘广钟¹

(上海海事大学信息工程学院 上海 201306)¹ (复旦大学上海市智能信息处理重点实验室 上海 200433)²

摘 要 针对水声传感器网络的特殊性,提出一种基于多种群萤火虫的路由协议,以确保数据包在水声传感器网络各节点之间正确、高效地转发。首先构造水声传感器网络的网络模型;然后,设计3种类型的萤火虫,通过各种萤火虫之间的协同工作提高路由路径构建的自适应性并实现路由路径的选择和优化。仿真实验结果表明,与传统的水声传感器网络路由协议相比,在节点数量相同的情况下,该路由协议的数据包传送率更高,平均端到端延时更低,并且在平均数据传送率相同情况下,网络吞吐量更大。

关键词 水声传感器网络,多种群萤火虫,路由协议

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Multi-population Firefly Based Routing Protocol in Underwater Acoustic Sensor Networks

XU Ming^{1,2} LIU Guang-zhong¹

(College of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)¹

(Shanghai Key Laboratory of Intelligent Information Processing, Fudan University, Shanghai 200433, China)²

Abstract Considering the unique characteristics of underwater acoustic sensor networks (UWASNs), this paper proposed a Multi-population Firefly based Routing (MFR) protocol to ensure that data packets can be correctly and efficiently forwarded in UWASNs. Firstly, we presented the network model of our UWASNs. And then, we designed three kinds of fireflies and their coordination rules in order to improve the self-adaptability of building, selecting and optimization of routing path. We demonstrated through simulations that our routing protocol outperforms traditional protocols in packet delivery ratio, end-to-end delay and network throughput under the same circumstances.

Keywords Underwater acoustic sensor networks, Multi-population firefly, Routing protocol

1 引言

水声传感器网络是一门新兴的网络技术,是无线传感器网络在水下的一种应用。目前,水声传感器网络在海洋环境监测、水下导航和水下预警等领域有着广泛的应用^[1,2]。由于陆上传感器网络中使用的高频无线电信号进入水下以后会迅速被水吸收,因此,水声传感器网络主要依靠水声的方式进行通信。从拓扑结构上来说,水声传感器网络可以分为二维网络和三维网络^[3,4]。二维水声传感器网络主要由固定在同一深度的传感器节点构成,用来监测某一特定的水平面。三维水声传感器网络中的节点存在于不同的深度,用来探测和观察二维水声传感器网络不能充分观察到的现象。由于水下信道的复杂性,传感器节点之间的链路质量受到环境噪声等干扰,严重影响了水声传感器网络的数据传输速率、通信信道的可靠性和网络吞吐量^[5]。此外,由于水下设备非常昂贵,导致水声传感器网络中节点的分布较为稀疏。因此,陆上传感器网络以及传统的 Ad hoc 网络中许多研究成果无法直接应用于水声传感器网络,这就要求必须针对水声传感器网络的新特性设计新的路由协议,以保证在数据包传送率、端到端延

时和网络吞吐量等指标上达到符合实际需要的性能要求。

传染性路由(Epidemic Routing, ER)协议^[6]采用“存储-携带-转发”的模式,即节点存储接收到的数据包,并在移动时携带,当遇到新节点时转发数据包。与传染性疾病的传播类似,每次携带数据包的节点遇到新的不包含该数据包的节点时,携带节点就传送一份数据包来“感染”新节点。然后,新感染的节点用同样的模式继续感染其它节点。目的节点第一次遇到感染节点时,接收数据包。传染性路由协议可以利用每一个机会将数据包转发到目的节点,在不受约束的网络环境下,可以达到最大的数据包传送率。但是,由于传染性路由消耗的资源过多,使得该协议无法适用于资源有限的网络,例如水声传感器网络。定向扩散路由协议(Directed Diffusion)^[7]是一种基于数据的、查询驱动的路由协议。为建立路由,汇聚节点向网络广播一个兴趣包(包含属性列表、上报间隔、持续时间、地理区域等信息),沿途节点按需对各兴趣包进行缓存与合并,并根据兴趣包计算、创建包含数据上报率、下一跳等信息的梯度(Gradient),从而建立多条指向汇聚节点的路径。然后,根据收到数据包的质量,确定一条从汇聚节点到源节点的优化路径。定向扩散路由协议适用于动态性较小的网络环

收稿日期:2013-02-08 返修日期:2013-06-04 本文受国家自然科学基金项目(61202370),上海市科学技术委员会浦江人才计划项目(11PJ1404300),上海市教委科研创新重点项目(12ZZ151),上海市智能信息处理重点实验室开放课题(HIPL-2011-008)资助。

徐 明(1977—),男,博士,讲师,主要研究方向为 P2P 网络、水声传感器网络、计算智能理论与方法, E-mail: mingxu@shmtu.edu.cn; 刘广钟(1962—),男,博士,教授,主要研究方向为计算机网络技术、水声通信技术、网格计算、CIMS 技术、分布式数据库等。

境,这种网络中大多数节点是静止的,因此转发路径相对稳定。但是,如果把定向扩散应用到水声传感器网络中,由于水声通信网络节点的移动性,它将会消耗大量的资源来维持转发路径。并且,由于数据聚合过程中需要采用时间同步技术,因此会带来较大的网络时延。此外,定向扩散路由协议中梯度建立的开销也很大,不适合包含多汇聚节点的水声传感器网络。基于向量的转发协议(Vector-Based Forwarding, VBF)^[8]是一种适用于水声传感器网络的路由协议。该协议将路由路径指定为一个向量,靠近路由向量的节点负责转发数据包。算法具有开销少、能量有效、传输成功率高和端到端传输延时低等特点。但是算法需要事先确定一个路由“管道”半径,这使得算法在具体的应用中,要求由用户来设置路由“管道”半径,很不方便。此外,在节点密度较低的区域,VBF路由协议可能无法找到接近路由向量的路径。基于深度的路由协议(Depth-Based Routing, DBR)^[9]利用深度传感器感知的深度信息进行简单的贪转发,试图选择离目标节点最近的节点,即深度最小的节点为下一跳转发节点,同时防止其它邻居节点转发同样的数据包来减小能量消耗。在此过程中,数据包越接近目的节点,转发节点的深度越小。但是,在稀疏网络环境下容易出现路由空洞,从而导致路由失败。

群智能优化算法是近几十年发展起来的仿生模拟进化算法,具有操作简单、易于并行处理、鲁棒性强等特点。由于群智能优化算法的性能特征及其自组织能力与水声传感器网络的相似性,本文将研究以萤火虫算法^[10,11]为代表的群体智能优化算法,提出一种基于多种群萤火虫的路由协议(Multi-population Firefly based Routing, MFR),通过3类萤火虫的协同工作实现三维水声传感器网络路由路径的选择和优化。

2 网络模型

考虑一个由 n 个分布在监测区域的水声传感器节点组成的三维水声传感器网络 $G(V, E)$, 其中 V 是节点集, E 是边集。这些水声传感器节点相对于水声信号传播速度而言具有较低的移动性。每个水声传感器节点都被分配一个三维坐标 (x, y, z) , 并且这些节点都具有相同大小的水声通信半径 r 。

定义1 三维欧拉空间中任意两个节点 n_u 和 n_v 之间的距离由函数 $\delta(u, v)$ 给出:

$$\delta: N \times N \rightarrow \Gamma; \delta(u, v) = \sqrt{(u_x - v_x)^2 + (u_y - v_y)^2 + (u_z - v_z)^2} \quad (1)$$

当 n_u 和 n_v 之间的欧拉距离小于 r 时,则 n_u 和 n_v 成为邻居节点,并且 n_u 和 n_v 之间存在一条链路。考虑用相关邻近图(Relative Neighborhood Graph, RNG)^[12]来构造网络拓扑结构,则节点 n_u 和 n_v 相邻的充分必要条件是:对 RNG 中任一节点 n_p , 都有 $\delta(u, v) \leq \max\{\delta(p, u), \delta(p, v)\}$ 。对于一个三维欧拉空间嵌入,如果由两个以 n_u 和 n_v 为中心的球体(半径为 $\delta(u, v)$)的交集形成的弓形区域为空,则 n_u 和 n_v 相邻。RNG 算法简单,可以看作寻找相对较近的节点配对,易于用分布式方法构造。如果按照定义构造 RNG,需要的时间复杂度为 $O(n^3)$ 。而从三角剖分图(Delaunay Triangulation Graph)构造 RNG,需要的复杂度下界为 $O(n \log n)$ ^[13],文献^[14]还给出了三维空间的 RNG 计算方法,复杂度为 $O(n^2)$ 。

水声传感器节点随着水流而漂移,其运动方式受限在不同的平面上,但是彼此的位置有可能保持相对稳定。由于构造 RNG 时并不需要每个节点及其邻居节点的准确位置,而

只需要知道每个节点到达其邻居节点的相互距离,因此, RNG 更适用于水声传感器网络的建模,可以获得比其它模型更为精确的结果。

两个最小跳数距离 h 上的节点 n_u 和 n_v 存在阈值 $u(h)$ 和 $v(h)$,使得 $u(h) \leq \delta(u, v) \leq v(h)$ 。其中,阈值的大小依赖于水声传感器网络的节点密度 ρ ,并且对任意 $h > 0$ 存在:

$$\lim_{\rho \rightarrow \infty} v(h) - u(h) = r \quad (2)$$

定义2 给定源节点 n_u 和目标节点 n_v ,则传感器模型定义为:

$$s(u, v) = \frac{\lambda}{\delta(u, v)^k + \epsilon} \quad (3)$$

式中, $\lambda > 0$ 并且 $\epsilon > 0$, λ 代表水声信号幅值, k 是传感器参数, ϵ 是一个预定义参数,用来处理源节点和目标节点位置相同的情况。

3 路由协议

针对水声传感器网络的路由协议具有自身的特殊性。首先,水声传感器网络节点的计算、存储和通信能力相对较弱,因此在其上不能实现复杂的路由协议。其次,水声传感器网络以数据为中心,这与传统网络根据节点编址选择路径不同。萤火虫算法用搜索空间中的点模拟自然界中的萤火虫个体,将搜索和优化过程模拟成萤火虫个体的吸引和移动过程,将求解问题的目标函数度量成个体所处位置的优劣,将个体的优胜劣汰过程类比为搜索和优化过程,并根据邻居节点的数量不断更改决策域大小,具有较强的全局搜索能力和收敛性。

萤火虫算法包含两个要素,即荧光素强度和吸引度。荧光素强度体现了萤火虫所处位置的优劣并决定其移动方向,吸引度决定了萤火虫移动的距离,通过荧光素强度和吸引度的不断更新,实现目标优化。从数学角度对萤火虫算法的优化机理进行如下描述:

定义3 萤火虫的荧光素强度定义为:

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma \cdot r^2} \quad (4)$$

式中, I_0 为萤火虫的自身荧光素强度($r=0$ 处),与目标函数值相关,目标函数值越优,则自身荧光素强度越高; γ 为荧光素吸收系数,用来表示荧光素强度随着距离的增加而逐渐衰减的速率,可设置为常数。 r 表示萤火虫之间的距离。

定义4 萤火虫的吸引度定义为:

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma \cdot r^2} \quad (5)$$

式中, β_0 为 $r=0$ 处的吸引度, γ 和 r 的意义同上。 $r=1/\sqrt{\gamma}$ 时称为特征距离,此时吸引度会从 β_0 显著变化到 $\beta_0 e^{-1}$ 。

假设任意两只萤火虫 i 和萤火虫 j 所处的空间位置分别为 x_i 和 x_j ,则这两只萤火虫之间的距离表示为 $r_{ij} = \|x_i - x_j\|$,则萤火虫 i 被吸引到荧光素强度更高的萤火虫 j 方向的位移定义为:

$$\Delta x_i = \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha \cdot \epsilon_i, x_i^{t+1} = x_i^t + \Delta x_i \quad (6)$$

式中, α 为步长因子,是一个随机参数。 ϵ_i 是一个服从高斯分布的随机数向量。

为了实现水声传感器网络中基于多种群萤火虫的路由协议,需要定义3种类型的萤火虫:搜索萤火虫、监听萤火虫和更新萤火虫。

搜索萤火虫(sf):每个水声传感器节点都可以根据需要创建一个或者多个搜索萤火虫,它可以在水声传感器网络节点之间移动并将收集到的节点信息存储到自身携带的移动数

据栈(ds)中,以便与其它搜索萤火虫共享。搜索萤火虫的任务是发现从源节点到汇聚节点的路由路径。源节点创建一个搜索萤火虫时,会赋予该搜索萤火虫在网络中的生存时间 TTL(Time-to-live),当它移动到某个节点上时,其 TTL 值会减 1;当 TTL 值为 0 或者移动到汇聚节点上时,搜索萤火虫的生命周期立即结束。

监听萤火虫(lf):每个处于唤醒状态的水声传感器节点上都存在一个监听萤火虫。监听萤火虫负责监听搜索萤火虫的移动数据栈信息并改变搜索萤火虫的移动路径。

搜索萤火虫在运动过程中会根据其邻居节点上各监听萤火虫的荧光素强度来决定其移动方向。假设节点 n_i 上有一只搜索萤火虫 sf_i ,其邻居节点 n_j 上有一只监听萤火虫 lf_j ,则 sf_i 移动到节点 n_j 上的概率 P_{ij} 如式(7)所示:

$$P_{ij} = \frac{I_j - I_i}{\sum_{k \in N_i} (I_k - I_i)} \quad (7)$$

式中, N_i 是节点 n_i 的邻居节点集合。

当节点 n_i 上创建的搜索萤火虫 sf_i 移动到路由路径上的某个节点 n_j 上时, n_j 上的监听萤火虫 lf_j 将会损耗部分荧光素,损耗量表示为:

$$\Delta I_j = |I_i - I_j|^\mu \cdot e^{-\gamma \cdot r^2} \quad (8)$$

式中, $0 < \mu < 1$, 用来表示荧光素损耗率。当两只由同一源节点创建的搜索萤火虫在某节点相遇时, TTL 值较小的搜索萤火虫停止移动,并将其携带的移动数据栈转移给该节点上的监听萤火虫。TTL 值较大的搜索萤火虫继续移动,直到发现汇聚节点或者生命周期结束。

更新萤火虫(uf):当搜索萤火虫到达汇聚节点后,汇聚节点将会创建一个更新萤火虫,用于更新路由路径上各节点的监听萤火虫荧光素强度并进行路由路径的选择和优化。更新萤火虫的初始荧光素强度 $I(u)$ 表示为:

$$I(u) = \frac{I_s}{\|x_u - x_s\|^\sigma} \quad (9)$$

式中, I_s 是到达汇聚节点的搜索萤火虫荧光素强度; $0 < \sigma < 1$, 用来表示荧光素更新率。更新萤火虫不会发光,当移动到路由路径的某个节点 n_i 上时,会将自身的荧光素转移一部分给 n_i 上的监听萤火虫,转移量表示为:

$$\Delta I_i = \frac{I(u) \cdot \|x_u - x_i\|}{\sum_{n_j \in P} \|x_u - x_j\|} \quad (10)$$

式中, n_j 是路由路径 P 上的任一节点。

算法 1 基于多种群萤火虫的路由协议

输入:源节点 n_s , 目标节点 n_t ;

输出:优化路由路径 $mes, path$;

1. 对相关参数进行初始化($mes, path \leftarrow \Phi$);

2. 节点 n_s 取出数据包 mes ;

3. if mes 在节点 n_s 命中 then

4. 按式(9)创建一只更新萤火虫 uf_s ;

5. for all sensors in $mes, path$ do

6. if $n_p \in mes, path$ then

7. 按式(10)更新 n_p 的监听萤火虫荧光素强度;

8. else $n_p, ds, add(mes, path)$;

9. 节点 $n_i \leftarrow mes, path, next()$;

10. endif

11. endfor

12. return $mes, path$;

13. else if 节点 n_s 不是目标节点 then

14. 节点 n_s 创建一只搜索萤火虫 sf_s ;

15. $mes, path, add(n_s)$;

16. while $sf_s, TTL > 0$ do

17. 搜索萤火虫 sf_s 按式(7)移动到邻居节点 n_j 上;

18. 搜索萤火虫 sf_s 按式(6)计算出位移量并存储到移动数据栈 n_s, ds 上;

19. 节点 n_j 上的监听萤火虫 lf_j 按式(8)更新荧光素强度;

20. $mes, path, add(n_j)$;

21. $n_s \leftarrow n_j$;

22. $sf_s, TTL \leftarrow sf_s, TTL - 1$;

23. endwhile

24. else if 搜索萤火虫 $sf_s, TTL = 0$ then

25. return Φ ;

26. endif

基于多种群萤火虫的路由协议定义了 3 类萤火虫群体,这样不同的萤火虫群体在进化时不仅可以从自身所在群体获得信息,而且可以从其它萤火虫群体获取信息进行自身的优化,从而实现 3 个群体的协同进化,提高算法的收敛速度和求解精度。在路由过程中,路由策略的选择和维护主要通过各类萤火虫对荧光素的调节来实现。搜索萤火虫在节点之间移动时会逐渐消耗各节点上监听萤火虫的部分荧光素。如果搜索萤火虫可以到达汇聚节点,则汇聚节点可通过创建更新萤火虫来为路由路径上各节点的监听萤火虫补充更多的荧光素,从而吸引更多的搜索萤火虫选择成功路由路径上的各节点作为中继节点。反之,如果搜索萤火虫在其生命周期内无法到达汇聚节点,则在路由过程中消耗的荧光素无法得到补充,使得这些节点被再次选择作为中继节点的概率减小。传统的萤火虫算法执行到后期时,萤火虫个体徘徊在峰值附近,甚至出现振荡现象。此外,当所给问题的搜索空间较大或者密度分布不均匀时可能会出现一些萤火虫的邻居集合为空集,导致算法收敛速度缓慢并且容易陷入局部最优,搜索到解的精度不高。

表 1 不同路由协议的算法复杂度比较

路由协议	路由跳数	存储代价
VBF	最好情况 $O(hd/r)$, 最坏情况 $O(nw/h)$	$O(d)$
DBR	最好情况 $O(hd/r)$, 最坏情况 $O(n)$	$O(d)$
MFR	最好情况 $O(h/r)$, 最坏情况 $O(n/d)$	$O(dl)$

表 1 对不同路由协议的复杂度进行了比较。其中,监测水域大小为 $h \times h \times h$, 节点总数为 n , 节点的平均度数为 d , 水声通信半径为 r 。此外, VBF 中路由向量为 w , MFR 中平均路径长度为 $l(l < TTL)$ 。从表 1 中可以看出,在最好情况下, MFR 的路由跳数最少,该情况的发生说明在 MFR 中搜索萤火虫找到了从源节点到汇聚节点之间的最短路径;在最坏情况下, DBR 的路由跳数最多,该情况的发生说明在 DBR 中深度阈值被设置为 0 并且节点的平均度数过低以至于导致路由空洞的发生。MFR 消耗的存储代价最大,这是因为每个搜索萤火虫都需要存储路由路径中各节点的移动数据栈信息。但是由于 MFR 的路由路径长度不会超过 TTL,并且水声传感器网络节点的平均度数通常较低,因此 $O(dl)$ 的存储代价在水声传感器网络环境下是可以接受的。

4 仿真实验与性能分析

本文采用 Aqua-Sim^[15] 作为评测路由协议的仿真平台。Aqua-Sim 是构建在 NS-2 网络平台基础上的水声传感器网络

仿真器,它可以仿真水声信号的传播与衰减以及水声传感器网络中数据包的转发与碰撞。本文假定汇聚节点静态部署在水面上,其它水声传感器节点服从随机游走(Random Walk)运动模型,运动速率的波动范围为 1 米/秒至 5 米/秒。表 2 给出了仿真实验参数与默认值。

表 2 仿真实验参数与默认值

参数	默认值
水声传感器节点数量	100~600
监测水域大小	5 千米×5 千米×5 千米
汇聚节点数量	8
数据发送率	6 数据包/秒
数据包大小	40 字节
节点传送半径	100 米
荧光素吸收系数 γ	0.6
荧光素损耗率 μ	0.2
荧光素更新率 σ	0.3
步长因子 α	0.04

本文将根据以下指标来评价基于向量转发的路由协议(Vector-Based Forwarding, VBF)、基于深度的路由协议(Depth-Based Routing, DBR)以及基于多种群萤火虫的路由协议(Multi-population Firefly based Routing, MFR)的性能:

1)数据包传送率,即是汇聚节点成功接收到的不同数据包的数量与源节点发送的数据包总数之间的比率。如果一个数据包多次到达汇聚节点,则视为成功接收一个不同数据包;

2)平均端到端延时,即是数据包从源节点发出并到达汇聚节点的平均时间;

3)网络吞吐量,即是汇聚节点在单位时间接收到的数据总字节数。

在第 1 组实验中,本文比较了不同路由协议中数据包传送率与节点数量之间的关系。如图 1 所示,3 种路由协议的数据包传送率都与节点数量成正比。其中,MFR 的数据包传送率在相同节点数量情况下超过其它 2 种路由协议。DBR 的数据传送率比 VBF 平均高出 28.1%,而 MFR 的数据传送率比 VBF 平均高出 33.2%。这说明 MFR 中通过荧光素的调节可以有效指导搜索萤火虫找到路由路径。

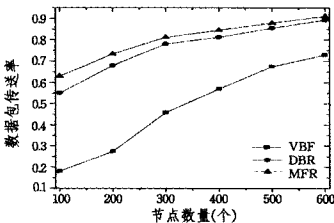


图 1 数据包传送率与节点数量的关系

在第 2 组实验中,本文比较了不同路由协议中平均端到端延时与节点数量之间的关系。如图 2 所示,随着节点数量的增多,DBR 和 MFR 的平均端到端延时呈下降趋势,但是节点数量的增多对 VBF 的平均端到端延时指标影响不明显,这是由于 VBF 中路由由节点的选择受限于路由向量,因此汇聚节点的数量对其路由性能的影响力很微弱。当节点数量为 100 时,VBF 的平均端到端延时低于 DBR 和 MFR;随着节点数量的增多,DBR 和 MFR 的平均端到端延时会低于 VBF 的平均端到端延时。在相同节点数量情况下,MFR 的端到端延时比 DBR 的端到端延时平均低 14.5%。

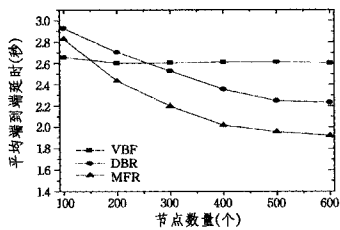


图 2 平均端到端延时与节点数量的关系

在第 3 组实验中,本文比较了不同路由协议中网络吞吐量与平均数据传送率之间的关系。如图 3 所示,3 种路由协议的网络吞吐量都与平均数据传送率成正比。在相同数据传送率情况下,DBR 和 MFR 的网络吞吐量要高于 VBF 的网络吞吐量。当数据传送率不超过 600 字节/秒时,MFR 的网络吞吐量略低于 DBR 的网络吞吐量。但是,随着数据传送率的增高,MFR 的网络吞吐量逐渐超过 DBR 的网络吞吐量。当数据传送率超过 600 字节/秒时,MFR 的网络吞吐量比 DBR 的网络吞吐量平均高 2.9%,比 VBF 的网络吞吐量平均高 7.8%,说明 MFR 的网络吞吐量在数据传送率较高的情况下表现更好。这是因为随着 MFR 算法的收敛以及数据传送率的增高,交叉路由路径出现的概率会增大,有助于搜索萤火虫找到更短的路由路径,进而提高网络吞吐量。

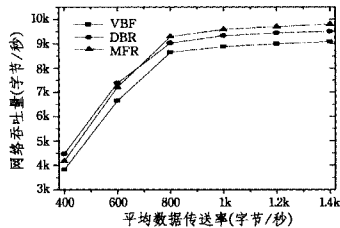


图 3 网络吞吐量与平均数据传送率的关系

结束语 本文提出了一种适用于水声传感器网络环境下的基于多种群萤火虫的路由协议,即通过 3 种类型萤火虫之间的协同工作来提高路由路径构建的自适应性并实现路由路径的选择和优化。仿真实验结果表明,基于多种群萤火虫的路由协议可以有效提高数据包传送率以及降低端到端延时,并且在网络吞吐量指标上优于传统的水声传感器网络路由协议。

参考文献

- [1] Manjula R, Sunilkumar S. Issues in Underwater Acoustic Sensor Networks[J]. International Journal of Computer and Electrical Engineering, 2011, 3(1): 101-110
- [2] Akyildiz I, Pompili T. Underwater Acoustic Sensor Networks; Research Challenges[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(3): 257-279
- [3] Partan J, Kurose J, Levine B. A Survey of Practical Issues in Underwater Networks [C]//Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Underwater Networks. Los Angeles, USA; IEEE Computer Society, 2006; 17-24
- [4] Jornet J, Stojanovic M, Zorzi M. On Joint Frequency and Power Allocation in a Cross-Layer Protocol for Underwater Acoustic Networks[J]. IEEE Journal of Oceanic engineering, 2010, 35 (4): 936-947
- [5] Ravelomna V. Extremal Properties of Three dimensional Sensor Networks with Applications[J]. IEEE Transactions in Mobile Computing, 2004, 3(3): 246-257

- [6] Vahdat A, Becker D. Epidemic Routing for Partially Connected Ad Hoc Networks [R]. TR CS-200006, 2000
- [7] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks [C]//Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Boston, Massachusetts, USA; ACM, 2000; 56-67
- [8] Xie P, Cui J, Lao L. VBF: Vector-based Forwarding Protocol for Underwater Sensor Networks [C]//Proceedings of Networking 2006. LNCS 3976, Heidelberg; Springer-Verlag, 2006; 1216-1221
- [9] Yan H, Shi Z, Cui J. DBR: Depth-based Routing for Underwater Sensor Networks [C]//Proceedings of the IFIP Networking 2008. Singapore; Springer Press, 2008; 72-86
- [10] Yang X. Firefly Algorithms for Multimodal Optimization [C]//Lecture Notes in Computer Science 5792. Springer, 2009; 169-178

- [11] Yang X, Hosseini S, Gandomi A. Firefly Algorithm for Solving Non-convex Economic Dispatch Problems with Valve Loading Effect[J]. Applied Soft Computing, 2012, 12(3): 1180-1186
- [12] Toussaint G. The Relative Neighborhood Graph of A Finite Planar Set[J]. Pattern Recognition, 1980, 12(4): 261-268
- [13] Bose P, Devroye L, Evans W, et al. On the Spanning Ratio of Gabriel Graphs and Beta-Skeletons [C]//Proceedings of the Latin Theoretical Informatics Conference. Berlin, Springer-Verlag, 2002; 479-493
- [14] Supowit K. The Relative Neighborhood Graph with An Application to Minimum Spanning Trees[J]. Journal of Association for Computing Machinery, 1983, 30(3): 428-448
- [15] Xie P, Zhou Z, Peng Z, et al. Aqua-Sim: An NS-2 Based Simulator for Underwater Sensor Networks [C]//OCEANS 2009, MTS/IEEE Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges. Biloxi, USA; IEEE Computer Society, 2009; 1-7

(上接第 60 页)

图 6(a)是发送方发送的 f_x 力数据散点图,图 6(b)是接收方经插值计算后输出的力数据散点图。为了更清楚地展示插值计算的效果,将图 6 中 840ms~860ms 之间的数据进行放大。图 7(a)显示了发送的完整的 f_x 数据,图 7(b)显示了接收到的有丢包的数据,图 7(c)显示了插值后的输出效果,从图中不难看出,3.2.2 节采用的差值预处理算法误差较小,取得了良好的效果。

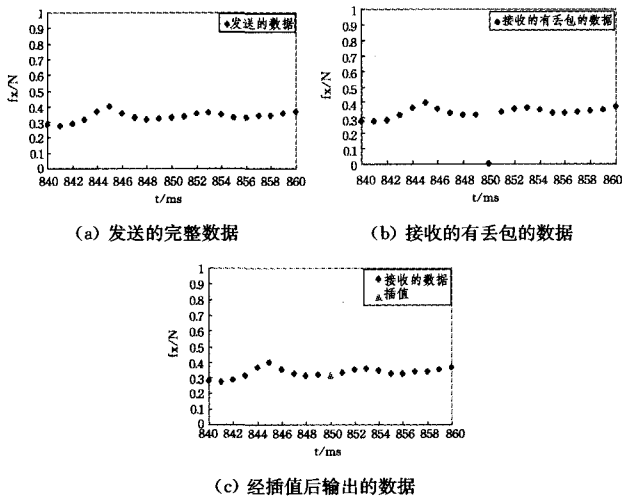


图 7 部分放大的发送/接收反馈力数据散点图

结束语 力反馈数据的实时、可靠传输是远程触觉交互的关键技术之一。本文针对在远程触觉交互系统中由网络性能导致系统实时性、稳定性差的问题,以实时传输和真实再现力反馈数据为目的,提出了一种新的基于 TCP/IP 的实时力反馈数据传输方法,主要工作有:(1)针对网络状况选取合适的时间偏移值,将网络随机时延转化为固定时延;(2)在接收端增加插值预处理,减少因丢包、乱序造成的输出误差。实验结果证明:本文提出的方法可以有效地解决远程触觉交互系统中实时力反馈信息再现与信息交互问题,在远程医疗、远程教学、虚拟现实等领域具有重要的应用价值。在此基础上,下一步的研究可以考虑利用接收者的历史数据构建合理的数学模型进行力反馈的预测,进一步增强远程触觉交互体验。

参考文献

- [1] 史英海,王越超.基于 Internet 力反馈技术研究[J].机器人, 2004, 26(4): 331-332
- [2] 周芝庭,等.互联网应用中触觉通信时延问题分析[J].测控技术, 2008, 27(4): 53-55
- [3] Rakhsha R, Constantinescu D. Distributed haptic cooperation with passive multirate wave communications[C]//IEEE Haptics Symposium 2012. Canada, 2012; 117-123
- [4] Kammerl J, Vittorias I, Nitsch V, et al. Perception-based data reduction for haptic force-feedback signals using adaptive dead-bands[J]. MIT Press Journals, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 2010, 19(5): 450-462
- [5] Yap K M. Supporting Collaborative Interaction with Real Time Force Feedback in Distributed Haptic Virtual Environments over IP Networks[C]//Proceedings of the IEEE Fourth International Conference on Genetic and Evolutionary Computing (ICGEC-2010). Shenzhen, 2010; 497-500
- [6] Yap K M, Lee T H. A Study to Support Haptic Collaboration with Real Time Force Feedback over Wireless Networks[C]//2011 First International Conference on Robot, Vision and Signal Processing(RVSP). Kaohsiung, 2011; 348-351
- [7] Lee Dong-jun, Huang Ke. Peer-to-peer control architecture for multiuser haptics collaboration over undirected delayed packet-switching network[C]//Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation(ICRA). 2010; 1333-1338
- [8] 徐兆红,宋成利,吴文武.微创外科机器人力反馈跟踪控制[J].生物医学工程学杂志, 2012, 29(3): 407-410
- [9] 张海青,栾楠,张诗雷,等.基于力反馈的颅颌面骨科手术机器人协调控制[J].机械与电子, 2012(5): 62-65
- [10] Bhattacharjee T, Son H I, Lee D Y. Haptic control with environment force estimation for tele surgery[C]//Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc. 2008; 3241-3244
- [11] Natarajan S, Ganz A. Efficient force feedback transmission system for tele-surgery[C]//Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc. 2008; 3245-3248
- [12] Hu Ling-yan, Xin Yong, Peng Jie, et al. The excitation controller of synchronous generator employing PID and fuzzy integrated algorithm based on S3C2410A[C]//Proceedings of ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management. Guangzhou, 2008; 44-48