

# 基于位图索引的无线传感器网络可靠传输协议

周韧研<sup>1a,1b,2</sup>, 刘雷波<sup>1a,1b,2</sup>, 尹首一<sup>1a,1b,2</sup>, 魏少军<sup>1a,1b,2</sup>

(1. 清华大学 a. 移动计算研究中心; b. 微电子学研究所, 北京 100084; 2. 清华信息科学与技术国家实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 根据无线传感器网络中大量上行数据流实时传输的需求, 提出一种基于位图索引的可靠传输协议(BRDT)。该协议使用迭代方式完成一组大量数据的传输。每次迭代的上行数据流采用无重传传输以减少延迟, 并采用可靠后项传输传送带有错误标识的位图索引以恢复丢失数据。在已有低功耗无线图像传感器网络 Z-EYE 系统中实现并进行验证, 结果表明, 与 RMST 协议相比, BRDT 对下层的 service 需求少, 在网络质量较差的情况下, BRDT 的性能明显优于 NACK 重传方法, 在同等测试条件下, BRDT 的传输效率优于 PSFQ 协议。

**关键词:** 无线传感器网络; 无线图像传感器网络; 可靠传输; 位图索引; 终端-网关; 错误恢复

## Reliable Transmission Protocol for Wireless Sensor Network Based on Bitmap Index

ZHOU Ren-yan<sup>1a,1b,2</sup>, LIU Lei-bo<sup>1a,1b,2</sup>, YIN Shou-yi<sup>1a,1b,2</sup>, WEI Shao-jun<sup>1a,1b,2</sup>

(1a. Research Center for Mobile Computing; 1b. Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Beijing 100084, China)

**【Abstract】** A Bitmap index based Reliable Data Transmission(BRDT) protocol applied in Wireless Sensor Network(WSN) which demands real-time upstream massive data transmission, is proposed. In the BRDT, data generated by the sensor nodes are transferred through several iteration cycles. Each iteration cycle contains a retransfer-free data flow and an index packet transmission through back channel to recover lost packets. The performance of the BRDT is obtained from simulation and is verified on the Z-EYE system, results show that compared with the RMST, the BRDT has less service demanding on lower layer, the BRDT has better performance improvement than the widely used NACK retransfer method in high packet loss rate networks, and the BRDT has better transmission efficiency than the PSFQ in the same test situation.

**【Key words】** Wireless Sensor Network(WSN); wireless image sensor network; reliable transmission; bitmap index; terminal-gateway; error recovery

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.21.017

### 1 概述

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)在某些特定应用环境下具有大量数据可靠传输的需求, 最典型、最广泛的例子是传感器节点的在线重新编程, 这类应用要求传输的可靠性高, 对实时性的要求取决于重编程的频度。低功耗小体积的 CMOS 图像传感器上市后, 产生了无线图像传感器网络<sup>[1]</sup>的概念。尽管可在传感节点进行压缩等图像处理, 但与采集简单物理信息(温度、压力等)的传统无线传感器网络相比, 无线图像传感器网络依然需要较大规模的数据传输, 并对实时性有较高的要求。针对于图像在无线传感器网络中的传输研究<sup>[2-3]</sup>, 即利用某些图像压缩算法本身的特性, 利用不同级别可靠性的信道匹配传递优先级不同的数据块。但这类图像压缩算法软

硬件实现复杂, 不适合于低功耗的无线传感器网络节点。

目前, 最简单、应用最广泛的增加传输可靠性方法是基于 ACK 或者 NACK(Negative-ACK)的自动重传策略(Automatic Repeat-request, ARQ)<sup>[4]</sup>, 在链路层和传输层均可使用。基于 ACK 或者 NACK, 以往研究提出了整套可靠传输协议, 比较知名的协议有 RMST(Reliable Multi-Segment Transport)<sup>[5]</sup>和 PSFQ(Pump Slowly, Fetch Quickly)<sup>[6]</sup>。RMST 首次提出了在可靠传输过程中使用后向信道, 利用 NACK 反馈丢帧信息, 并对端到端和逐跳控制、以及中间节点的缓存有无等各种情况进行了分析。RMST 协议要求链路层提供 ARQ, 使用 ACK 的方式对单播数据包提供可靠性保证。PSFQ 协议提供了较为通用、底层依赖性较小的可靠传输方案, 一般数据以及 NACK

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60803018); 科技部重大专项基金资助项目(2009ZX03006-004)

**作者简介:** 周韧研(1985—), 男, 博士研究生, 主研方向: 无线传感器网络; 刘雷波, 副教授、博士; 尹首一, 副研究员、博士; 魏少军, 教授、博士

**收稿日期:** 2012-01-21 **修回日期:** 2012-02-27 **E-mail:** zhourx03@mails.tsinghua.edu.cn

均通过广播的方式传送,并提供慢发快取、主动抓包的机制增强数据完整性。RMST 和 PSFQ 的设计初衷分别是应用于上行数据传输和下行数据传输,但这 2 个协议若经过调整,均具有一定的通用性。

本文提出的基于位图索引的可靠传输协议(Bitmap index based Reliable Data Transmission, BRDT)是针对上行大量数据可靠传输需求提出的传输层协议。它不要求对单播数据包提供必须的可靠性保证,故对底层传输服务的要求较少;使用可靠后向信道以位图索引的方式提供群组丢帧信息,提高延迟消耗较多的有 ARQ 信道的使用效率。本文将对此算法进行分析和理论仿真比较,并介绍在 Z-EYE 无线图像传感器网络的实现与测试结果。

## 2 BRDT 协议设计和分析

### 2.1 协议流程

在传输前的准备阶段,数据源节点已经拥有了需要传送的数据,设总数据量为  $S_t$ 。数据目标节点已经准备好了数据的接收。数据源到数据目标的端到端(End-to-End)连接已经创建,如果是多跳网络,则位于路由路径上的中间节点也准备就绪(例如,有足够的能量完成此次传输)。

在传输阶段中,设下层每个数据包的有效负载量为  $S_p$ ,总数据量为  $S_t$ 。在数据源节点,总数据量被切割为  $N=S_t/S_p$  个有效数据包(PD)。每个 PD 附有序号 1~ $N$ 。数据目标节点维护一个位图索引,这个索引表的每一个 bit 代表一个 PD 是否已经可靠接收到,且在每次接收到一个 PD 后都会依据其序号得到更新。在 BRDT 协议中,一次数据传输由多个迭代循环组成。每个迭代循环由数据目标节点发起:它将索引表(PIDX)通过后向传输机制发送给数据源节点。数据源节点接收到索引表后,按照索引表将目标数据节点空缺的 PD 批量发送给数据目标节点。随后,数据源节点发送一个标志命令包(PEOC)给数据目标节点。数据目标节点收到 PEOC 或者迭代循环超时后,一次迭代循环即告结束。当目标数据节点检查到所有 PD 都已经接收后,就结束本次传输,否则,下一个迭代循环即开始。PIDX 要求有可靠实时的下行通路,PEOC 要求有可靠性略低的上行通路,PD 不对上行通路的可靠性有要求。对于可靠通路,在底层无法提供 ARQ 的情况下,将使用传输层 ARQ。传输结束后,控制权交给传输层的上层。

### 2.2 协议算法分析

BRDT 是传输层协议,故“丢帧率” $q$  应定义为下层所有操作的总和。例如无法恢复的帧数据错误、帧丢失、帧超时等事件,BRDT 均视为“丢帧”。下文中以  $p$  和  $q$  代表单跳无保证传输的成功和丢帧概率,  $p \equiv q-1$ 。假设在一次传输之内  $p$  的值保持稳定。

#### (1)索引表的级数

在一个 8 bit 字节的系统中,需要  $N/8$  个 Byte 才能够构成一个位图索引。在  $N$  很大的情况下,位图索引表的尺寸会超过每数据包的有效负载  $S_p$ 。在此情况下,可以构建多级位图索引,或者将索引表分割为多个 PIDX,或者两

者兼用。如果只建立多级位图索引,那么总级数  $K$  由式(1)确定:

$$K = \lceil \log_8(N/S_p) \rceil \quad (1)$$

对于第  $k$  级索引,其长度为:

$$N_k = N/8^k \quad (2)$$

第  $k$  级索引每个 bit 都代表  $M_k$  个数据包的有效性:

$$M_k = 8^{k-1} \quad (3)$$

由于这种指数关系,使用很多级的索引会导致传输无法进行:假如使用 3 级索引,那么只有当  $M_3=64$  个包在一次传输循环内都到达情况下,索引表才能发生更新。在一个  $p=0.9$  的网络中,这个事件的概率仅为  $0.9^{64}=0.0012$ 。另一方面,如果使用 2 级索引,  $S_p=32$  Byte(典型值),则  $S_t$  最大就可支持 64 KB,如使用到无线图像传感器网络中,每次即可足够传送一帧接近 QVGA 尺寸的无压缩灰度图像。综上,建议索引表的级数  $K$  不超过 2。

#### (2)单跳传输

设每一个 PD 进行一次单跳无保证传输的延迟为  $t_0$ ,  $t_0$  受  $p$  的影响可以不计<sup>[7]</sup>。对于一次传输中的  $N$  个 PD,设迭代循环数量为  $C$ ,第  $i$  个迭代循环传输的 PD 数量为  $n_i$ ,则 PD 传输的总延迟为:

$$L_{PD} = \sum_{i=1}^C n_i t_0 = N \times t_0 \quad (4)$$

传输 PIDX 和 PEOC 占用的时间取决于迭代循环次数  $C$ 。

单个 PD 在第  $i$  个迭代循环传输成功的概率为:

$$f(i) = q^{i-1} p \quad (5)$$

可得分布函数为:

$$F(i) = \sum_{k=1}^i f(k) = 1 - q^i \quad (6)$$

PD 的传输都是独立同分布的,因此,  $C$  的分布函数  $F_C(i)$  为:

$$F_C(i) = \max(F(i_m)) \Big|_{m=1}^N = F^N(i) = (1 - q^i)^N \quad (7)$$

$C$  的期望值  $E(C)$  为:

$$E(C) = E(f_C(i)) = \sum_{i=1}^{\infty} (i \times ((1 - q^k)^N - (1 - q^{k-1})^N)) \quad (8)$$

假设 PIDX 和 PEOC 均采用无限制重传次数的 ARQ,此时传输延迟和丢帧率有关。

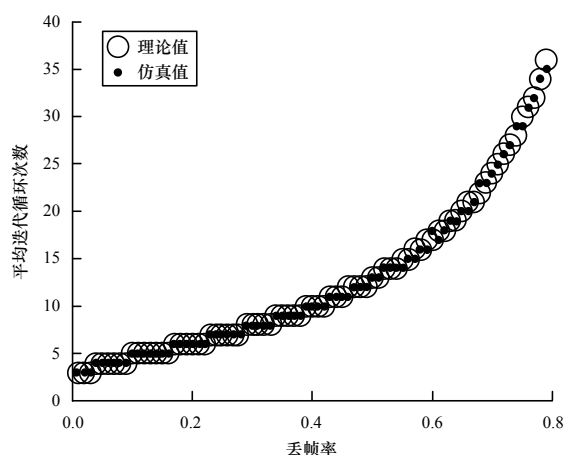
$$t_{PIDX} = \alpha_{PIDX} \times t_0 / p, t_{PEOC} = \alpha_{PEOC} \times t_0 / p$$

其中,  $\alpha_{PIDX}$  和  $\alpha_{PEOC}$  是和传输本身无关的系数,取决于下行和上行 ARQ 的具体实现。

假设索引表不分割,则每个迭代循环只有一个 PIDX 和 PEOC 传输,因此,总延迟为:

$$L = L_{PD} + L_{PIDX} + L_{PEOC} = (N + (\alpha_{PIDX} + \alpha_{PEOC}) / p \times E(C)) \times t_0 \quad (9)$$

关于不同  $q$  之下  $E(C)$  的理论计算值和仿真值如图 1 所示。取  $N=2048$ ,  $\alpha_{PIDX}$  和  $\alpha_{PEOC}$  一般数值都不大,取 5~10 左右。可见在丢帧率高达 70% 时,平均迭代循环数不超过 25 次。这意味着 BRDT 协议的单跳传输延迟主要取决于 PD 数量  $N$ 。

图 1 不同丢帧率  $q$  情况下的迭代循环次数

### (3)多跳传输

由于 PD 传输不需要 ARQ, 因此中间节点只是简单地数据包转发。所以, 端到端的传输成功率  $p_e = p^h$ ,  $h$  为跳数。多跳延迟分析可借用单跳, 只需用  $p_e$  替换掉  $p$ ,  $t_0 \times h$  替换  $t_0$ 。

由于实时延迟估算相对困难, PEOC 采用与 PIDX 相同的高可靠性和高实时性要求。所以, BRDT 建议 PEOC 和 PIDX 使用逐跳重传方式。若使用 ACK, 则单个迭代循环中 PEOC 和 PIDX 的路径总延迟和跳数  $h$  成正比。在跳数  $h$  很大的情况下,  $p_e$  会以指数衰减,  $E(C)$  将会显著增大, 这使得 PEOC 和 PIDX 的传输占据总延迟的比例增大。

表 1 列举了 PSFQ 协议在 3 跳~5 跳、 $N=50$  情况下, 以及 BRDT 在相同  $t_0$  设置,  $N=2\ 048$  的仿真值等效于  $N=50$  的情况下的延迟。比较显示, 在 BRDT 可适用的场景下, 性能优于同样场景下的 PSFQ 算法。

表 1 PSFQ 协议和 BRDT 协议的性能比较

Hop	$q/(%)$	PSFQ	BRDT
3	20	2.40	1.55
	40	3.70	1.58
	70	16.50	1.77
4	20	2.60	2.07
	40	4.80	2.13
	70	21.30	2.68
5	20	2.70	2.59
	40	6.70	2.69
	70	24.00	4.15

### (4)算法复杂度

BRDT 协议的运算部分集中在由 PD 编号生成索引以及由索引还原 PD 编号的过程。由 PD 编号生成索引是一个直接映射的操作, 其时间复杂度为  $O(1)$ 。由索引还原 PD 编号需要扫描索引表一遍, 其时间复杂度为  $O(n)$ 。在现代嵌入式处理器中, 这些操作均可以在几十个指令之内完成。

在 BRDT 协议中, 数据源节点和数据目标节点需要保留长度为  $S_t$  的数据, 而中间节点只需要保存数个  $S_p$  大小的空间作为 PD 的转发。除此之外, 包括中间节点在内的所有节点, 还需要有空间保存所有的索引表。由于索引表

的尺寸成几何级数衰减, 因此索引表所占空间不超过  $N/7$ 。对于  $N=2\ 048$  的传输规模, 每个节点用于存放索引表的内存空间需几百字节。

## 3 协议实现和测试

### 3.1 硬件平台

Z-EYE 无线图像传感网系统由采集节点(TN)、路由节点(RN)、汇聚节点(CN)和上位机组成。所有节点的核心均为一枚包含有无损 JPEG 压缩器和无线收发单元的 THLK-2405 无线图像传感网专用 SoC<sup>[8]</sup>。节点自图像传感器采集和压缩一帧 VGA 彩色图像的时间约为 0.6 s, 压缩后数据总量为 80 KB~120 KB。在无线通信部分, 片内 IEEE 802.15.4 链路加速器提供对底层无线收发单元的控制, 节点帧间平均最小间隔为 7 ms(80 Byte/帧), 即相当于最大吞吐率 90 Kb/s。

### 3.2 实现与测试

在 Z-EYE 硬件平台上对 BRDT 进行了单跳网络和静态树形多跳网络的实现。使用无操作系统的 C 语言以准确测定性能。在竞争时隙通告图像拍摄完成的信息并监听来自上级网络的命令, 无竞争时隙用于建立数据连接。

实验选取不同  $q$  的部署场景。源数据根据拍摄景物的不同, 在 80 KB~120 Byte 之间变化。PD 负载为 64 Byte, 数据包最大值  $N=2\ 048$ 。采取  $K=2$  的 2 层索引, 第 1 级索引大小 256 Byte, 第 2 级索引中每个 bit 代表第 1 级索引中的 4 个 bit, 这样 PIDX 的负载大小恰好为一帧的负载大小 64 Byte。节点内数据处理流程如图 2 所示。

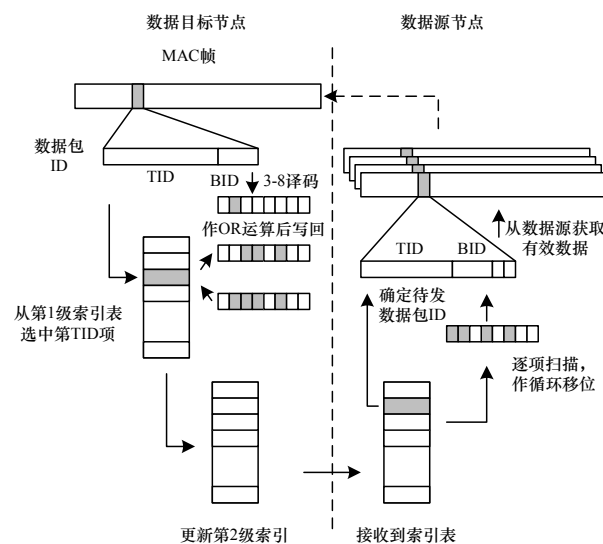


图 2 节点内数据处理流程

场景 1 为室外布控情景, 在 80 m×160 m 的空旷空间内部署无线图像传感器网络, 跳数为 2 跳; 场景 2 为存在较大信道干扰的室内情景, 在拐角区间部署单跳网络。测试场景示意图如图 3 所示。每次实验每个节点拍摄图像 100 帧, 取各参数的平均值。实测值与理论或仿真值如表 2 所示。可见, 循环迭代次数与总传输延迟的实测数据与理论仿真值吻合较好。

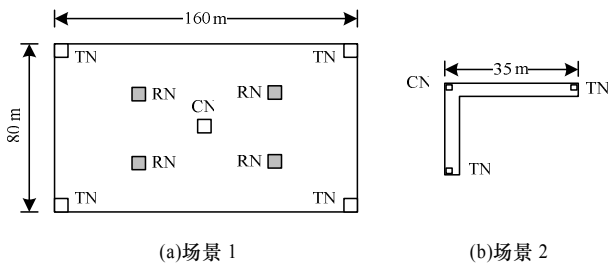


图 3 测试场景示意图

表 2 测试场景的关键数据对比

场景	实测			C		L/ms	
	q/(%)	t <sub>0</sub> /ms	N	理论	实测	仿真	实测
场景 1	12	8.5	1 482	5	5	15.3	16.2
场景 2	33	8.3	1 360	9	10	15.1	17.7

4 结束语

本文提出了一种可适用于无线传感器网络的大量可靠上行数据传输协议 BRDT，它的每个迭代循环中数据传输采用无 ARQ 信道，减少了延迟损耗；错误恢复机制采用位图索引包，减轻了后向信道的带宽需求。与传统可靠传输方法 NACK 以及可靠传输协议 PSFQ 相比，BRDT 具有更优的传输效率；与类似架构的 RMST 协议相比，BRDT 对底层的服务需求少，也可作为通用无线图像传感器网络可靠数据传输协议得以应用。BRDT 已在无线图像传感器网络系统中实现，实际测试结果与理论和仿真值相吻合。

参考文献

[1] Misra S, Reisslein M, Xue G. A Survey of Multimedia Streaming in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Communications Surveys

and Tutorials, 2008, 10(4): 18-39.

[2] Pekhteryev G, Sahinoglu Z, Orlik P, et al. Image Transmission over IEEE 802.15.4 and ZigBee Networks[C]//Proc. of 2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Kobe, Japan: [s. n.], 2005: 3539-3542.

[3] Aghdasi H S, Abbaspour M, Moghadam M E. An Energy-efficient and High-quality MAC Protocol for Image Transmission in Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of the 4th IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications. Shanghai, China: [s. n.], 2008: 838-842.

[4] Wang Chonggang, Sohraby K, Li Bo, et al. A Survey of Transport Protocols for Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Network, 2006, 20(3): 34-40.

[5] Heidemann S F. RMST: Reliable Data Transport in Sensor Networks[C]//Proc. of the 1st International Workshop on Sensor Net Protocols and Applications. Anchorage, USA: [s. n.], 2003: 102-112.

[6] Wan Chieh-Yih, Campbell A T. Pump-slowly, Fetch-quickly: A Reliable Transport Protocol for Sensor Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(4): 862-872.

[7] Shu F, Sakurai T, Zukerman M, et al. Packet Loss Analysis of the IEEE 802.15.4 MAC Without Acknowledgements[J]. IEEE Communications Letters, 2007, 11(1): 79-81.

[8] Zhou Renyan, Liu Leibo, Yin Shouyi, et al. A VLSI Design of Sensor Node for Wireless Image Sensor Network[C]//Proc. of IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Paris, France: [s. n.], 2010: 149-152.

编辑 索书志

(上接第 58 页)

5 结束语

稀疏的评分数据导致协同过滤算法搜寻出的最近邻对指定项目有评分的极少，严重影响了算法的推荐质量。本文提出一种基于主成分分析和 SVD 填补的混合协同过滤算法。在 MovieLens 数据集上进行实验，结果表明本文算法能有效提高推荐质量。今后将引入准确性更高的填补方法，进一步提高算法推荐质量。

参考文献

[1] 吴 湖, 王永吉, 王 哲, 等. 两阶段联合聚类协同过滤算法[J]. 软件学报, 2010, 21(5): 1042-1054.

[2] Lee S K, Cho Y H, Kim S H. Collaborative Filtering with Ordinal Scale-based Implicit Ratings for Mobile Music Recommendations[J]. Information Sciences, 2010, 180(11): 2142-2155.

[3] Resnick P, Iacovou N, Suchak M, et al. Grouplens: An Open Architecture for Collaborative Filtering of Netnews[C]//Proc. of Conference on Computer Supported Cooperative Work. New York, USA: ACM Press, 1994.

[4] Adomavicius G, Tuzhilin A. Toward the Next Generation of Recommender Systems: A Survey of the State of the Art and Possible Extensions[J]. IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering, 2005, 17(6): 734-749.

[5] 余锦华, 杨维权. 多元统计分析与应用[M]. 广州: 中山大学出版社, 2005.

[6] Sarwar B M, Karypis G, Konstan J A, et al. Application of Dimensionality Reduction in Recommender System: A Case Study[C]//Proc. of ACM WebKDD Workshop. New York, USA: ACM Press, 2000.

[7] GroupLens Research[EB/OL]. (2010-08-16). <http://www.GroupLens.org/>.

[8] 张 锋, 常会友. 使用 BP 神经网络缓解协同过滤推荐算法的稀疏性问题[J]. 计算机研究与发展, 2006, 43(4): 667-672.

[9] 邓爱林, 朱扬勇, 施伯乐. 基于项目评分预测的协同过滤推荐算法[J]. 软件学报, 2003, 14(9): 1621-1628.

编辑 陆燕菲

