

面向紧急数据的异步多信道工业无线网络调度方法

杨莉^{1,2}, 张晓玲², 梁炜^{2*}, 朱立忠¹

(1. 沈阳理工大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110159; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所 网络化控制系统重点实验室, 沈阳 110016)

(* 通信作者电子邮箱 weiliang@sia.cn)

摘要: 针对现有时分多址(TDMA)调度方法在面对异步多信道条件下工业紧急数据调度时表现出的时延大、控制信道(CC)饱和、能耗过高等问题,提出一种基于接收端的紧急数据调度方法——EOAM。首先,采用基于接收端的策略,解决了异步多信道调度中存在的控制信道饱和问题;其次,采用特殊信道(SC)结合优先级指示的方法保证紧急数据快速切换信道进行实时传输的同时,允许非紧急数据基于优先级指示标志采用退避机制占用信道,保证了特殊信道的利用率。该方法既适用于单播通信,也适用于广播通信。仿真实验结果表明,相比分布式控制算法(DCA),EOAM的传输延时最低可达8ms,可靠性可达95%以上,能量消耗降低了12.8%,能满足工业紧急数据的传输需求。

关键词: 工业无线网络; 紧急数据; 多信道; 介质访问控制; 调度

中图分类号: TP393; TN92 **文献标志码:** A

Emergency data scheduling method for asynchronous and multi-channel industrial wireless sensor networks

YANG Li^{1,2}, ZHANG Xiaoling², LIANG Wei^{2*}, ZHU Lizhong¹

(1. School of Information Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning 110159, China;

2. Key Laboratory of Networked Control Systems, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110016, China)

Abstract: The existing Time Division Multiple Access (TDMA) scheduling methods for industrial emergency data under the conditions of asynchronous and multi-channel medium have the problems of high delay, saturated Control Channel (CC), and large energy consumption. To solve these problems, an Emergency data scheduling algorithm Oriented Asynchronous Multi-channel industrial wireless sensor networks, called EOAM, was proposed. First, the receiver-based strategy was adopted to solve the problem of saturated control channel during asynchronous multi-channel scheduling. Then a well-designed Special Channel (SC) together with the priority indication method was proposed to provide fast channel switch and real-time transmission of emergency data; additionally, the non-urgent data was allowed to occupy channel by a backoff-based mechanism indicated by the priority indication method, which could ensure the utilization of special channel. EOAM was suitable for both unicast and broadcast communications. The simulation results show that, compared with the Distributed Control Algorithm (DCA), the transmission delay of EOAM can reach 8 ms, the reliability is above 95%, and the energy consumption is reduced by 12.8%, which can meet the transmission requirements of industrial emergency data.

Key words: Industrial Wireless Sensor Network (IWSN); emergency data; multi-channel; Medium Access Control (MAC); scheduling

0 引言

用于工业现场环境具备高可靠、硬实时、高安全特征的无线网络被称为工业无线网络(Industrial Wireless Sensor Network, IWSN)^[1]。无线技术低成本、易使用、易维护等优点,使得以较低投资和使用成本实现“泛在感知”和“全流程优化控制”的工业测控系统成为可能,具有广阔的应用前景,已成为工业测控和无线领域新的研究热点。

工厂自动化应用中的数据通常包括3类:安全、控制和监测^[2]。其中:安全是指关乎生产和人身安全的动作数据;控制是指闭环管理、闭环监督和开环等控制类数据;监测是指报警、登录和下载/上传等数据。不同类型的数据对应网络中不

同的性能需求,安全是紧急性最高的数据类。紧急数据要求苛刻的硬实时和高可靠性能,超过紧急数据的延上限,则会导致系统不稳定,带来经济损失,甚至危害人身安全^[3]。

介质访问控制(Medium Access Control, MAC)层负责为相互竞争的节点分配无线通信资源,是决定网络性能的关键技术^[4]。MAC协议是工业无线网络的核心技术,其设计目标是在延长网络寿命的前提下,保障网络中每个节点的实时性和可靠性要求^[5]。针对紧急数据的MAC协议,学者们开展了相关研究,具体可以分为两类:一个面向随机竞争访问方式;另一个面向固定分配访问方式。

Son等^[6]针对工业环境中非周期性的紧急数据,提出了一种动态退避算法,通过设置不同的退避指数(Backup

收稿日期:2014-08-19;修回日期:2014-09-25。 基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA06021000)。

作者简介:杨莉(1989-),女,山东菏泽人,硕士研究生,主要研究方向:工业无线网络、通信协议; 张晓玲(1982-),女,山西朔州人,副研究员,博士,主要研究方向:工业无线网络调度; 梁炜(1974-),女,内蒙古赤峰人,研究员,博士,主要研究方向:工业通信、无线传感器网络; 朱立忠(1967-),男,辽宁沈阳人,教授,主要研究方向:智能控制、图像处理与融合、移动通信。

Exponent, BE) 和竞争窗口 (Contention Window, CW) 初始值来进行动态退避调整。文献 [7-9] 中提出了一系列针对保障时隙 (Guaranteed Time Slot, GTS) 的适应性调度或分配机制, 以获得低延时、改善带宽利用率或者保证紧急数据的公平性。Bhatti 等^[10] 改进了信标使能的 IEEE 802.15.4 MAC 的超帧结构, 调换竞争访问阶段 (Contention Access Period, CAP) 和无竞争访问阶段 (Contention Free access Period, CFP) 的先后位置, 使得失败的 GTS 帧可以在同一超帧周期接下来的 CAP 阶段进行重传, 但会造成 GTS 重传与 CAP 通信量之间的竞争, 增加了 CAP 阶段的竞争。针对该问题, Mehta 等^[11] 在文献 [10] 超帧结构的基础上, 在 CFP 的末端引入扩展 CFP (Extended CFP, ECFP), 用于重传之前 CFP 阶段失败的 GTS 帧。上述成果可以在一定程度上减少延时或者提高可靠性, 但主要是以载波侦听多路访问/冲突避免 (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA) 机制为主, 不确定性较大, 无法为紧急数据提供有保证的高性能信道接入, 特别不适用于周期性的紧急控制数据等。

由于不可预测的紧急数据具有发生的不确定性, 时分多址 (Time Division Multiple Access, TDMA) 方法不能为其提供优先分配的专用传输时间, 进而不能保证不确定的紧急数据的性能。Shen 等^[12] 提出了一种面向紧急数据的增强优先级 MAC 协议, 引入了高优先级指示空间 (High Priority Indication Space, HPIS), 允许高优先级紧急数据抢占低优先级数据的时隙, 能够很好地解决不可预测的紧急数据的实时传输问题。文献 [13] 中提出一种次最优的分布式控制算法 (Distributed Control Algorithm, DCA), 将数据传输问题转化为以最大化不同数据类的加权服务为目标的 Lyapunov 漂移最优化问题。文献 [14] 中提出一种异步多信道无线传感器网络 MAC 协议 RIM (Receive Initiated MAC), 利用接收端开始的传输机制有效地解决了控制信道饱和问题, 采用基于概率的随机信道选择机制避免了三重隐终端问题, 同时, RIM 支持一种简单且可靠的异步广播机制。然而, 文献 [12] 只是针对单信道进行资源调度, 当节点多通信量比较大时, 竞争问题凸显。文献 [13] 虽然是针对多信道进行资源调度, 然而, 该算法随着信道数的增加, 控制信道饱和问题严重, 能耗较高。文献 [14] 在控制信道饱和问题和能耗方面提供了很好的解决方法, 然而该算法没有考虑不可预测的紧急数据的传输问题。同时, 由于文献 [13] 的算法是通过源节点和目的节点在控制信道交换信道信息来确定传输信道, 而文献 [14] 是基于接收端开始的异步多信道 MAC 协议, 所以文献 [13] 的算法不能在文献 [14] 的机制基础上实现。

针对以上问题, 本文提出了一种面向工业紧急数据的异步多信道 MAC 调度方法——EOAM (Emergency data scheduling algorithm Oriented Asynchronous Multi-channel IWSNs), 解决多信道通信中不可预测紧急数据的实时传输问题, 最后实验验证了算法的实时性和能耗。

1 网络模型

1.1 工业无线网络中的数据模型

如表 1 所示, EOAM 算法面向两类典型的工业紧急数据:
1) 不可预测的紧急数据 (Traffic Category 1, TC1)。TC1

具有最高优先级, 主要是指紧急安全动作要发送的数据, 比如紧急关闭、紧急报警等, 具有不可预测、重现率低等特点。

2) 普通紧急数据 (Traffic Category 2, TC2)。TC2 的优先级较 TC1 低, 主要包括闭环管理控制、闭环监督控制、开环控制, 该类数据具有重现率高等的特点。

表 1 工业无线网络中的数据模型

数据分类	优先级	特征	应用	延时要求
TC1	1(高)	不可预测, 低重现率, 紧急	紧急安全动作	尽可能减小
TC2	2(低)	高重现率, 紧急	闭环管理控制、闭环监督控制、开环控制	几十毫秒~1s

1.2 超帧模型

超帧 (Superframe) 由信道 (Channel) 和时隙 (Timeslot) 构成, 如图 1 所示。所谓信道, 是指无线射频信号发送的媒介, 是频段的若干等份; 所谓时隙, 是指时间的若干等份, 时隙大小取决于网络中数据的大小, 时隙的数量决定超帧的长度。

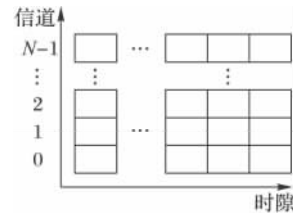


图 1 超帧结构

对于单信道网络, 超帧中仅包括一条信道; 对于多信道网络, 超帧中包括多条信道。本文针对多信道网络, 超帧中包括多条信道以及若干时隙。

定义信道模型如下:

1) 将可用信道划分为一个控制信道 (Control Channel, CC) 和多个数据信道 (Data Channel, DC)。

2) 为了提高不可预测的紧急数据 TC1 的实时性和可靠性, 本文在数据信道 DC 中设置一个特殊信道 (Special Channel, SC), 属于 TC1 和广播数据 (Broadcast Data, BD) 的专用传输信道; 同时, 采用指示退避机制, 使得普通紧急数据 TC2 也可以选择使用该信道, 避免资源浪费, 保证信道资源的利用率。

定义时隙模型如下。

1) 为了保证 EOAM 算法适用于广播通信, 将 SC 的时隙长度 T 定义为节点发送一个 TC1 数据包的平均时间与发送一个 BD 数据包的平均时间的较大值, 即 $T = \max\{t_{TC1}, t_{BD}\}$, 其中: $t_{TC1} = t_{RTS} + t_{CTS} + t_{DATA} + t_{ACK}$, t_A 表示节点发送一个 A 包的平均时间, A 为各类包的统称。

2) 为了使得 TC1 能够利用特殊信道进行实时可靠传输, 本文将时隙划分为高优先级指示空间 (High Priority Indication Space, HPIS) 和非高优先级指示空间 (Not High Priority Indication Space, NHPIS), 其中, HPIS 由两个等长的子时隙 t_0 和 t_1 组成, 分别用于待发送 TC1 数据包的节点发送 RTS (Request To Send) 和接收 CTS (Clear To Send), 如图 2 所示。

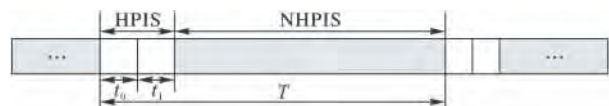


图 2 特殊信道中的时隙

2 EOAM 算法

本章首先介绍适用于单播通信的 EOAM 算法步骤,并将其扩展到广播通信的情况。EOAM 算法的总体思想主要包括 3 个方面:

1) 为了保证不可预测高优先级紧急数据的实时性,采用专门的特殊信道进行传输,特殊信道时隙的高优先级指示空间(HPIS)和非高优先级指示空间(NHPIS),以保证紧急数据的优先传输。

2) 同时为了避免特殊信道时隙的浪费,采用指示机制,在保证不可预测紧急数据的目的节点快速切换信道的同时,使得选择使用特殊信道的普通数据在紧急数据占用信道时能够进行退避,不干扰紧急数据传输,而在特殊信道空闲时能充分利用信道资源。

3) 为了保证不可预测的紧急数据和广播数据的确定性传输,将特殊信道中时隙的长度设置为发送这两类数据所需平均时间的较大值,保证数据在该时隙长度内完整传输。

2.1 单播通信

EOAM 中单播通信分为 TC2 单播通信和 TC1 单播通信两种情况,分别如图 3 和图 4 所示。

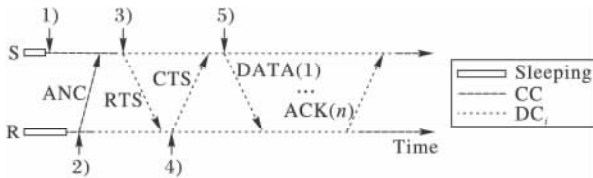


图 3 TC2 单播通信

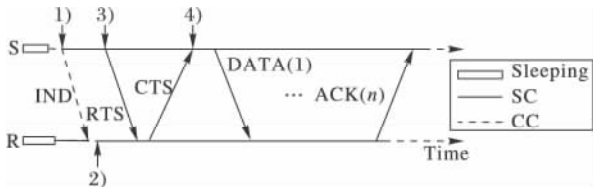


图 4 TC1 单播通信

TC2 单播通信过程包括以下步骤:

1) 当处于睡眠阶段的发送节点 S 有 TC2 数据要发送给接收节点 R 时, S 首先开启其无线收发器,然后在 CC 上侦听。如果 S 侦听到指示(Indication, IND),且 IND 中的目的节点地址为自身地址时, S 立即切换到 SC 侦听。

2) 当 R 睡眠时间到达后, R 通过在 CC 发送一个声明消息包(Announcement, ANC)来开始一个潜在的数据传输,该 ANC 中包含 R 选择的 DC 序号,例如 i ,然后 R 切换到 DC_i 进行侦听。R 采用一种基于概率的随机方法来进行信道选择,当 R 的睡眠时间到达时,它以概率 p 在所有 DC 中随机地选择一个 DC,而以概率 $1-p$ 继续睡眠以节省能量。

p 定义为平均可用 DC 数 A 与总 DC 数 K 之比; K 可由协议设计确定; $A = K - \lambda \times (1/P)$,其中: λ 为报文到达速率, P 为报文长度服从分布的参数,详细证明过程见文献[15]。如果 R 在发送 ANC 前侦听到 IND,且 IND 中的目的节点地址为自身地址时, R 立即切换到 SC 侦听。

3) S 在 CC 上收到 R 发送的 ANC 以后, S 立即切换到 DC_i ,首先检测信道状态,若空闲,则发送一个 RTS 控制包;若忙碌,则随机退避一段时间后发送一个 RTS 控制包。如果 S

在 CC 上侦听时间 T_{max} 后仍然没有收到 R 发送的 ANC, S 主动在 CC 上发送一个 ANC,以避免由于 R 在 CC 上等待 S 发送 ANC 而导致的死锁问题。

4) 当 R 收到 RTS 后, R 发送一个 CTS 控制包来确认这次预约。当 R 切换到 DC 后,如果没有收到来自其他节点的 RTS, R 则根据自己的占空比切换回 CC,然后进入睡眠阶段。

5) 当 S 收到 CTS 后, S 利用 DATA&ACK 的方式与 R 进行数据传输。当传输完毕后,它们切换回 CC,然后进入睡眠阶段。

TC1 单播通信过程包括以下步骤:

1) 当处于睡眠阶段的发送节点 S 有 TC1 数据要发送给接收节点 R 时, S 首先开启其无线收发器,然后在 CC 发送 IND,之后切换到 SC。

2) 如果 R 在 CC 上侦听到 IND,立即切换到 SC 侦听。

3) S 在子时隙 t_0 发送一个 RTS 控制包,若此时 R 在 SC 侦听到 RTS, R 在子时隙 t_1 发送一个 CTS 控制包来确认这次预约。

4) 若 S 在子时隙 t_1 收到 R 发来的 CTS 控制包,那么就在该时隙接下来的 NHPIS 利用 DATA&ACK 的方式与 R 进行数据传输;若 S 在子时隙 t_1 没有收到 R 发来的 CTS 控制包,那么就在该时隙接下来的 NHPIS 持续发送 IND,然后在下一个时隙的子时隙 t_0 重新发送一个 RTS 控制包,重复上述过程。

算法流程如图 5 所示。

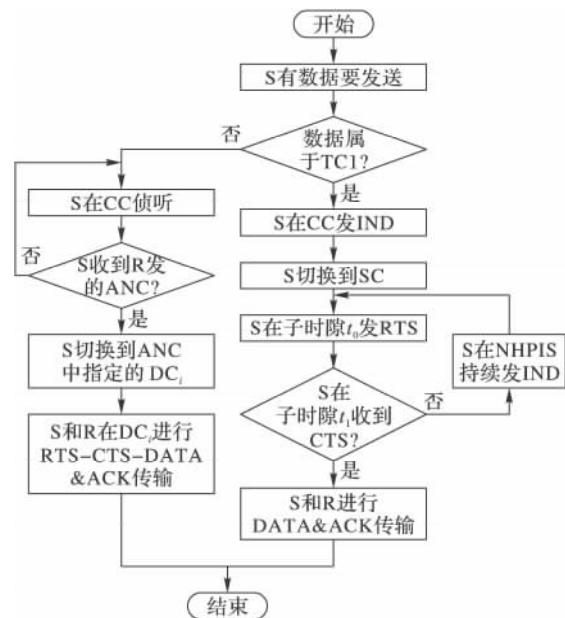


图 5 算法流程

2.2 广播通信

EOAM 中采用 SC 发送 BD,如图 6 所示,广播通信过程包括以下步骤:

1) 当处于睡眠阶段的发送节点 S 有 BD 要发送时, S 首先切换到 SC,然后开启其无线收发器检测 SC 信道状态。

2) 如果 SC 空闲,那么 S 在接下来的 M 个时隙内连续发送 M 个相同的数据包,其中, M 可以根据不同 WSN 的性能需求进行动态地调整,本文为节点的平均邻居数。如果 SC 忙碌,那么 S 随机退避一段时间。

3) 每个节点(包括睡眠节点)在 $M-1$ 个时隙内都切换到 SC 上来接收可能发送的 BD 包,从而 S 的每个邻居节点都可以在 M 个时隙内收到 BD。

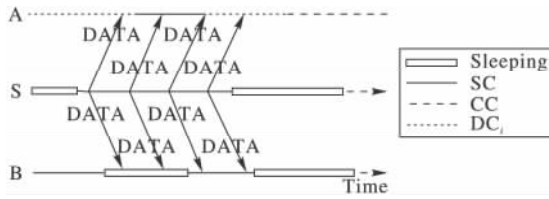


图 6 BD 广播通信

3 实验结果与分析

本章从实时性、可靠性和能耗 3 个角度,与文献 [13] 所提出的分布式多信道控制算法(DCA)进行仿真比较。仿真环境设置为:将 49 个节点分布在 $7\text{ m} \times 7\text{ m}$ 的网络中,节点随机地选择任一邻居节点进行单播通信,数据负载为 32 B,TC1 数据流的个数为 5,TC2 数据流的个数为 20。

延迟时间定义为从数据包到达发送节点 MAC 层开始,直到被接收节点成功接收的时间。图 7 所示为平均延迟随着信道数的增加而变化的趋势。由于 DCA 中 Class VI 为非紧急数据,所以在此不作比较。由图 7 可知,EOAM 中 TC1 的平均延迟一直低于 DCA 中数据类,这是由于 EOAM 针对 TC1 设计了特殊信道以及高优先级指示空间,专门用于 TC1 数据的紧急及时传输。当信道数较少时,EOAM 中 TC2 的平均延时要略高于 DCA 中的 Class III,这是由于 EOAM 是基于占空比机制和随机信道选择机制;然而随着信道数的增加,EOAM 中 TC2 的平均延时逐渐小于 DCA 的延时结果,这是由于控制信道的饱和问题在 DCA 中愈加严重,而 EOAM 基于接收端开始的介质访问机制则在一定程度上避免了控制信道饱和问题。

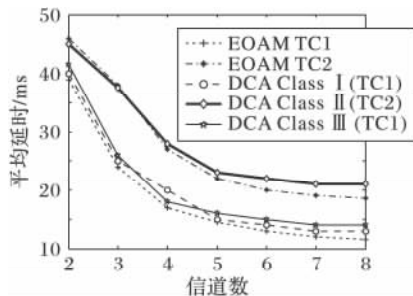


图 7 实时性比较

可靠性以包传输成功率表示,即成功传输的报文占总报文数的比例。由图 8 可知,EOAM 能够满足 TC1 和 TC2 的可靠性要求;并且随着信道数的增加,包成功传输率显著增大,最终都能达到 0.95~1。

能耗定义为成功传输一个字节所消耗的能量。由图 9 可知,随着信道数的增加,EOAM 的能耗逐渐降低,且明显低于 DCA 的能耗。其中,能量消耗单位为 $10^{-7}\text{ mW} \cdot \text{h}$,这主要是由于 EOAM 采用基于异步占空比的睡眠机制。

4 结语

工业应用无线传感器网络中存在大量优先级不同的紧急数据。本文针对多信道条件下的工业紧急数据的实时、可靠

传输问题,首先面向不同优先级紧急数据的单播通信过程,设计了一种基于接收端的调度方法,避免了控制信道饱和问题,在快速切换信道的前提下,保证紧急数据的实时性和可靠性需求;进而将该算法扩展到研究紧急数据的广播通信中。实验结果表明,该算法在实时性、可靠性和能耗方面具有较好的性能。下一步研究将综合考虑紧急数据的传输对于其他数据传输的影响,并针对工业无线网络中的各类数据的实时可靠传输,设计多优先级数据综合调度方法。

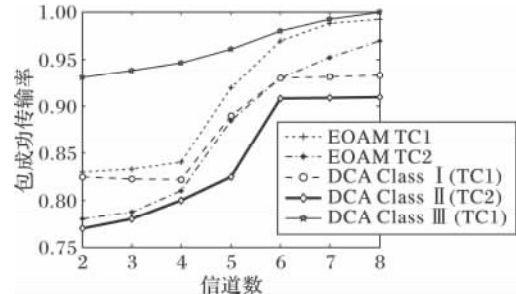


图 8 可靠性比较

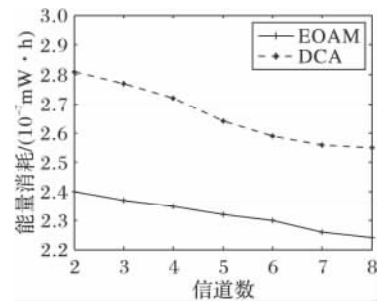


图 9 能量消耗比较

参考文献:

- [1] LIANG W, ZHANG X, XIAO Y, et al. Survey and experiments of WIA-PA specification of industrial wireless network [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2011, 11 (8): 1197 - 1212.
- [2] ISA 1 0 0 Committee. Wireless systems for industrial automation : process control and related applications [S]. Research Triangle Park: ISA, 2009.
- [3] AKERBERG J, GIDLUND G, LENNVALL T, et al. Efficient integration of secure and safety critical industrial wireless sensor networks [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2011, 2011: 100.
- [4] SUN L, LI J. Wireless sensor networks [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 59 - 88. (孙利民, 李建中. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 59 - 88.)
- [5] ZHANG J, CHEN Y, LI M. An energy-efficient division-frame MAC protocol for wireless sensor networks [J]. Information and Control, 2013, 42(1): 95 - 99. (张佳薇, 陈岩, 李明宝. 用于无线传感器网络的高能效分帧 MAC 协议[J]. 信息与控制, 2013, 42 (1): 95 - 99.)
- [6] SON N D, TAN D D, KIM D-S. Backoff algorithm for time critical sporadic data in industrial wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 2012 International Conference on Advanced Technologies for Communications. Piscataway: IEEE, 2012: 255 - 258.

(下转第 57 页)

理速度明显提高,加速比接近线性增长,因此,基于多态 GPU——PAAG 进行图形图像处理是合理且有效的。

表 1 15 个函数的加速比对比结果

函数	S_1	S_2	S_4	S_8	S_{16}	S_{32}	S_{64}
Remap	1	1.93	3.65	7.0	15.3	31.5	63.4
Scale Image	1	1.90	3.68	7.0	15.2	31.4	63.3
Thresholding	1	1.94	3.66	7.2	15.5	31.3	63.3
Channel Extract	1	1.91	3.73	7.1	15.6	31.5	63.4
Custom Convolution	1	1.94	3.80	7.1	15.6	31.4	63.5
Dilate Image	1	1.83	3.20	7.2	15.4	31.3	63.4
Erode Image	1	1.83	3.20	7.2	15.4	31.3	63.4
Sobel 3×3	1	1.94	3.80	7.5	15.7	31.7	63.6
Magnitude	1	1.94	3.80	7.6	15.8	31.6	63.7
Histogram	1	1.93	3.70	7.6	15.8	31.6	63.7
Min Max Location	1	1.94	3.70	7.3	15.5	31.4	63.5
Integral Image	1	1.90	3.69	7.0	15.3	31.2	63.4
Accumulate Squared	1	1.97	3.82	7.5	15.8	31.7	63.8
Harris Corners	1	1.86	3.69	7.2	15.5	31.2	63.7
Fast Corners	1	1.84	3.66	7.0	15.4	31.3	63.6

参考文献:

- [1] QIN G. Design and implementation of video acquisition and display system based on FPGA [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2009. (青格日勒. 基于 FPGA 的视频采集与显示系统的设计与实现[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2009.)
- [2] ZHOU Y. Parallel computing research for image processing [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006. (周益民. 图像处理并行算法的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.)
- [3] Khronos Group. The OpenVX provisional specification vision 1.0 [EB/OL]. [2014-04-28]. <https://www.khronos.org/openvx>.
- [4] LI T, XIAO L. A thin-core array architecture for graphics and image processing [J]. Journal of Xi'an Institute of Posts and Telecommunications, 2012, 17(3): 41-47. (李涛, 肖灵芝. 面向图形和图像处理的轻核阵列机结构[J]. 西安邮电学院学报, 2012, 17(3): 41-47.)
- [5] LINDHOLM E, NICKOLLS J, OBERMAN S, et al. NVIDIA Tesla: a unified graphics and computing architecture [J]. IEEE Micro, 2008, 28(2): 39-55.
- [6] LI T, XIAO L, HUANG H, et al. PAAG: a polymorphic array architecture for graphics and image processing [C]// PAAP12: Proceedings of the 2012 Fifth International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Programming. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2012: 242-249.
- [7] VEEN A H. Dataflow machine architecture [J]. ACM Computing Surveys, 1986, 18(4): 365-396.
- [8] NIXON M. Feature extraction & image processing for computer vision [M]. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2012: 1-512.
- [9] COMPTON K, HAUCK S. Reconfigurable computing: a survey of systems and software [J]. ACM Computing Surveys, 2002, 34(2): 171-210.
- [10] BOYD C. Data-parallel computing [J]. Graphics, 2008, 6(2): 30-39.
- [11] XIN D. A new method for image edge detection on CUDA [J]. Journal of Hangzhou Dianzi University, 2008, 28(5): 164-166. (辛大红. 基于 CUDA 的图像边缘检测方法[J]. 杭州电子科技大学学报, 2008, 28(5): 164-166.)
- [12] FENG H. Implementation and performance of FFT and convolution in image filtering on GPU [J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(2): 120-122. (冯煌. GPU 图像处理的 FFT 和卷积算法及性能分析[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(2): 120-122.)
- [13] ZHANG N, CHEN Y, WANG J. Image parallel processing based on GPU [C]// ICACC 2010: Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Computer Control. Piscataway: IEEE, 2010: 367-370.
- [14] PATEL H. GPU accelerated real time polarimetric image processing through the use of CUDA [C]// NAECON 2010: Proceedings of the IEEE 2010 National Aerospace and Electronics Conference. Piscataway: IEEE, 2010: 177-180.
- [7] NA C, YANG Y, MISHRA A. An optimal GTS scheduling algorithm for time-sensitive transactions in IEEE 802.15.4 networks [J]. Computer Networks, 2008, 52(13): 2543-2557.
- [8] KOUBÂA A, ALVES M, TOVAR E, et al. An implicit GTS allocation mechanism in IEEE 802.15.4 for time-sensitive wireless sensor networks: theory and practice [J]. Real-Time Systems, 2008, 39(1/2/3): 169-204.
- [9] HUANG Y-K, PANG A-C, HUNG H-N. An adaptive GTS allocation scheme for IEEE 802.15.4 [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2008, 19(5): 641-651.
- [10] BHATTI G, MEHTA A, SAHINOGLU Z, et al. Modified beacon-enabled IEEE 802.15.4 MAC for lower latency [C]// Proceedings of the 2008 IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway: IEEE, 2008: 1-5.
- [11] MEHTA A, BHATTI G, SAHINOGLU Z, et al. A modified beacon-enabled IEEE 802.15.4 MAC emergency response applications [C]// Proceedings of the 2010 IEEE Symposium on Computers and Communications. Piscataway: IEEE, 2010: 261-267.
- [12] SHEN W, ZHANG T, BARAC F, et al. PriorityMAC: a priority-enhanced MAC protocol for critical traffic in industrial wireless sensor and actuator networks [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(1): 824-835.
- [13] SHAH G A, GUNGOR V C, AKAN O B. A cross-layer QoS-aware communication framework in cognitive radio sensor networks for smart grid application [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(3): 1477-1485.
- [14] ZHANG D, LI J, GUO L. Asynchronous multi-channel MAC protocol for WSNs [J]. Journal of Software, 2012, 23(3): 613-628. (张德升, 李金宝, 郭龙江. 异步多信道无线传感器网络 MAC 协议[J]. 软件学报, 2012, 23(3): 613-628.)
- [15] ZHANG D, LI J, GUO L, et al. HM-MAC: a multi-channel MAC protocol for sensor network with broadcast supporting [J]. Journal of Computer Research and Development, 2009, 46(12): 2024-2032. (张德升, 李金宝, 郭龙江, 等. HM-MAC: 一种支持广播的多信道传感器网络 MAC 协议[J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(12): 2024-2032.)

(上接第 38 页)