

一种高可靠的多通道 MAC 协议^{*}

邢志浩^{1,2} 曾 鹏¹ 王 宏¹

(中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016)¹ (中国科学院研究生院 北京 100039)²

摘 要 针对工业无线传感器网络的应用需求和射频环境特点,提出了一种高可靠的多通道 MAC 协议 CHNP。协议中给出了一种基于协商模式通道切换机制的 MAC 架构,并基于该架构给出了一种通道切换模式选择算法和一种自适应传输机制。前者可以实现更高层次的并发传输,而后者可在动态变化的射频条件下自适应地选择高质量通道进行传输。仿真表明,与已有多通道协议相比,CHNP 可大幅提高网络的吞吐量、分组到达率以及 MAC 层延迟性能,并具有更好的抗干扰能力。

关键词 无线传感器网络,多通道,MAC 协议,工业

A Multi-channel MAC Protocol for Wireless Sensor Networks

XING Zhi-Hao ZENG Peng WANG Hong

(Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)¹

(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)²

Abstract This paper proposes the CHNP protocol, a highly reliable multi-channel MAC protocol which is optimized for the application requirement and radio environment of industrial wireless sensor networks. A MAC framework based on the channel hopping mechanism with negotiated pattern is provided in the protocol. At the same time, a hopping pattern selection algorithm and an adaptive transmission mechanism are designed to work on top of the framework. The former can achieve higher level parallel transmissions, and the latter can adaptively select the high quality channels for transmission in the dynamic radio environment. Simulation results show that compared with the existing multi-channel protocols, CHNP achieves a large performance improvement on throughput, packet delivery ratio, and MAC layer delay. What's more, it has the better capability of anti-interference.

Keywords Wireless sensor networks, Multi-channel, MAC protocols, Industrial

1 引言

无线传感器网络(WSN)^[1,2]借助于大量具有感知能力、计算能力和通信能力的微型传感器节点无线互连形成网络,实时地监测周围物理环境的变化,将逻辑上的信息世界与真实的物理世界融合在一起,在军事、环境、医疗、家庭以及商务等领域具有广泛的应用前景,成为当前研究热点。WSN 低成本、布署方便以及易于维护等诸多优点同样引起了工业界的极大兴趣。ISA 目前已着手制定用于工业监控的 WSN 协议栈标准 SP100.1x。

工业现场的射频环境通常较为恶劣,文[3]对工业射频环境下的网络通信质量进行了实验和分析总结,指出工业射频环境下较为严重的干扰和多径现象会严重恶化通信质量。而工业应用通常对通信可靠性有着较高要求,这使得目前的单通道 MAC 协议很难满足工业 WSN 应用需求。

事实上,目前许多用于无线传感器网络的射频芯片,如 Berkeley 的 Mica 系列芯片、Rockwell 的 WINS 节点所使用的射频芯片,以及遵循 IEEE 802.15.4 物理层标准的射频芯片都能够支持十几个甚至几十个独立通道。由于无线信道存在频率选择性,通常不会发生所有通道同时深衰落的现象,而工业射频环境中的窄带干扰通常也只会影响到部分通道,因而可以充分利用射频芯片的多通道能力,设计针对工业 WSN

应用环境和需求进行优化的 MAC 协议。

2 相关研究

在无线自组网研究领域,存在一些关于多通道 MAC 协议的研究。根据这些协议所采用的多通道机制的特点,可以分为以下三类:

(1) 基于专用控制通道的协议,如 DCA^[2],DCA-PC^[3]和 DPC^[4]。这类协议要求每个节点配备双射频。节点在传输数据前必须在专用的控制通道上以竞争方式进行 RTS/CTS 握手,协商数据传输通道。

(2) 基于两阶段信道访问的 MAC 协议,如 MMAC^[5]和 MAP^[6]。这类协议要求网络时间同步。时间被划分成交替的控制窗口和数据传输窗口。在控制窗口,通信双方需要在专用的控制通道上进行 RTS/CTS 握手,协商在数据传输窗口所使用数据传输通道。

(3) 基于同模式切换机制的 MAC 协议,如 CHMA^[7]和 CHAT^[8]。这类协议同样要求网络时间同步。时间被划分为等长的时隙,并且要求所有节点的时隙边界对齐。时隙长度要求能够容纳一次完整的 RTS/CTS 握手。网络中的所有节点遵循相同的通道切换模式,以时隙为单位进行同步的通道切换。通信双方在成功进行 RTS/CTS 握手后,停留在当前通道上完成数据传输,并在完成传输后重新加入同步的通道

^{*} 本文得到国家自然科学基金(60374072, 60434030)支持。邢志浩 博士,主要研究方向为无线传感器网络、MAC 协议设计与建模等。曾 鹏 博士,研究方向为网络体系结构与协议设计。王 宏 研究员,博士生导师,研究方向为工业通信与控制。

切换。

以上协议适用于分组较长、芯片抗干扰能力较强的无线网络。对于分组较短、芯片抗干扰能力较弱的 WSN, 这些协议具有以下无法回避的弱点:

(1) 以上协议在每次传输分组之前, 都依赖于在共同的控制通道上通过 RTS/CTS 握手协商数据传输所使用的通道。当分组较短且网络负载较大时, RTS/CTS 交互将使控制通道饱和, 形成性能瓶颈, 使得大量通道无法被充分利用。并且, 在分组较短的 WSN 应用中, RTS/CTS 交互本身也构成相当大的开销。

(2) 前两类协议依赖于在专用的控制通道进行 RTS/CTS 交互来协商数据传输通道。一旦控制通道受到严重干扰或发生深衰落现象, 网络性能将严重降级。

3 CHNP 协议

针对工业 WSN 应用中分组长度较短的特点, 以及工业 WSN 应用对分组传输可靠性的较高要求与恶劣的工业射频环境之间的矛盾, 本文提出了高可靠多通道 MAC 协议 CHNP。协议的逻辑结构框图如图 1 所示, 图中灰色部分为本文所要讨论的内容。

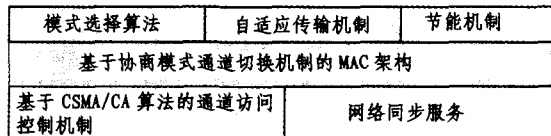


图 1 CHNP 协议的逻辑结构图

在基于 CSMA/CA 算法的通道访问控制机制和网络同步服务的基础上, CHNP 给出了一种基于协商模式通道切换机制的 MAC 架构。该架构使得 CHNP 协议无需依赖 RTS/CTS 握手协商数据传输通道, 也不存在控制通道瓶颈效应, 因而更加适用于工业 WSN 中的短分组传输。同时, 由于该架构不依赖专用控制通道, 因而从根本上避免了因专用控制通道通信质量下降导致网络性能严重恶化的问题。

在上述 MAC 架构的基础上, CHNP 给出了一种通道切换模式(规定了节点在各个时隙所使用的操作通道, 以下简称模式)选择算法和一种自适应传输机制。前者通过为同一冲突域中的节点分配不同的模式, 达到分割冲突域, 实现更高层次的并发传输的目的; 后者可在动态变化的射频环境中, 尽可能地将分组安排到高质量通道上传输, 从而有效提高恶劣射频环境下的传输可靠性。

此外, 一些基于网络同步的节能机制, 如文[11]中的同步信道查询机制也可应用到上述 MAC 架构之上, 以提高网络的能量效率。本文对此不做深入讨论。

3.1 相关概念

• 节点 v 的 k -跳邻居节点集合, $NS_k(v)$: 到达节点 v 的最短跳数小于等于 k 的所有节点的集合。

• 节点 v 的竞争节点集合, $CS(v)$: 对于节点 v 向其任意 1-跳邻居节点 w_i 发起的传输, 可能会对 w_i 接收分组产生干扰的所有节点的集合。当节点的干扰半径等于其通信半径时, 则有:

$$CS(v) = \bigcup_{w_i \in NS_1(v)} NS_1(w_i) = NS_2(v) \quad (1)$$

显然, 对于节点 v , 只有 $CS(v)$ 中的节点才会与其存在信道竞争关系。

• 节点 v 的冲突域, $CD(v)$: 节点 v 与 $CS(v)$ 中的所有节点一起, 构成节点 v 的冲突域, 即有

$$CD(v) = \{v\} \cup CS(v) \quad (2)$$

3.2 协议描述

3.2.1 基本协议架构

CHNP 协议在网络时间同步的基础上, 将时间划分为等长的时隙, 并要求所有节点的时隙边界对齐。时隙是节点进行通道切换的基本单位, 通道切换动作只能发生在时隙起始处。时隙长度允许传输一个或多个分组。时隙分为两类: 单播时隙和广播时隙。前者只能用于发送单播分组, 而后者被优先用于发送广播分组。处于同一冲突域中的各节点通过协商方式产生自己的模式, 并据此进行以时隙为单位的同步通道切换。

节点的模式由以下关键参数决定: 通道切换序列(HS)、广播时隙间隔(BI)、广播时隙起始通道(SC-BS)和单播时隙起始通道(SC-US)。HS 为所有可用通道的一个选定全排列。模式中每隔连续 BI 个单播时隙插入一个广播时隙。节点在各单播时隙的操作通道由二元组 $\langle HS, SC-US \rangle$ 唯一确定, 而在各广播时隙的操作通道由二元组 $\langle HS, SC-BS \rangle$ 唯一确定。以上参数除 SC-US 由各节点在协商基础上自行选择外, 其它参数都由网关节点统一决定并在网络初始化阶段广播到全网。

一个典型的模式结构如图 2 所示。图中的节点 A, B, C 属于同一冲突域, 射频芯片提供了 16 个独立通道。在网关节点上, HS 被配置为 (0, 4, 8, 12, 1, 5, 9, 13, 2, 6, 10, 14, 3, 7, 11, 15), 参数 BI 和 SC-BS 分别被设置为 4 和 0。节点 A, B, C 分别将自己的 SC-US 参数设置为 0, 4, 8。

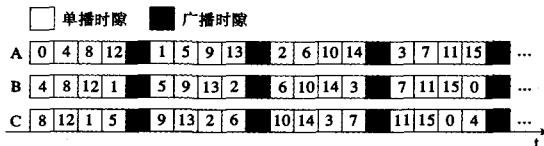


图 2 典型的模式结构

在两种类型的时隙中, 当节点需要发送数据时, 都采用基于 CSMA/CA 算法的通道访问控制机制竞争发送权。

由于选择不同 SC-US 参数的节点在各单播时隙都将处于不同的操作通道, 节点在需要发送时必须切换到目的节点的操作通道上竞争信道并发送分组。这就要求网络中各节点能够获知其任意 1-跳邻居节点在任意时隙的操作通道。网络中所有节点都维护一个本地的 SC-US 参数表, 表内记录着自己各 1-跳邻居节点选择的 SC-US 参数。据此, 节点即可获知其各 1-跳邻居节点在任意时隙的操作通道。

为提高广播时隙的利用效率, 节点在广播时隙中既可发送广播分组, 也可发送单播分组。在广播时隙, CHNP 协议通过为广播分组和单播分组规定不同的回退区间, 使广播分组具有较高的发送优先权。具体而言, 设整数 CW_B 和 CW_U 满足 $CW_B < CW_U$, 当节点需要发送广播分组时, 在区间 $[0, CW_B]$ 选择随机回退值进行回退; 而当节点需要发送单播分组时, 则在区间 $[CW_B, CW_U]$ 选择随机回退值进行回退。这样, 广播微时隙中的广播分组总是能够比单播分组提前完成回退从而得到优先发送。

3.2.2 模式选择算法

参数 SC-US 是决定模式的所有参数中唯一可由各节点

自行选择的参数,因此节点对模式的选择,其实就是对 SC-US 参数的选择。SC-US 选择算法在网络初始化阶段执行。在该阶段,网络中的所有节点处于相同的操作通道。在初始化阶段结束后,所有节点按照自己选定的模式同步启动通道切换操作。

SC-US 选择算法通过让处于同一冲突域中的节点选择不同 SC-US 参数,分割冲突域,从而最大程度地利用多通道能力实现并发传输,提高网络性能。算法要求网络中的每个节点具有能够唯一标志自己的 ID,并使用节点的 2-跳邻居节点集合来近似其竞争节点集合。算法包含两阶段的操作:

(1) 2-跳邻居节点 ID 信息的收集

在该阶段,网络中的每个节点需要进行两轮广播操作。在第一轮广播时,每个节点将自己的 ID 广播给自己的 1-跳邻居节点,在该轮广播操作结束时,网络中的每个节点完成了对其 1-跳邻居节点 ID 信息的收集。在第二轮广播时,每个节点将自己在第一轮广播时收集的所有 1-跳邻居节点 ID 信息广播给自己的 1-跳邻居节点。这样,到第二轮广播结束时,网络中各节点完成对其所有 2-跳邻居节点 ID 信息的收集。

(2) SC-US 参数的选择

在该阶段,各节点将自己的 ID 和所有 2-跳邻居节点的 ID 一起升序排列,并根据自己的 ID 排列中的顺序决定自己选择 SC-US 参数的时机。具体而言,对于任意节点 v ,如果在当前时刻节点集合 $NS_2(v)$ 中存在 ID 值小于自己且尚未选择 SC-US 参数的节点,则节点 v 必须等待这些节点完成选择后(收到这些节点发送的相应通知报文),才可根据以下规则选择自己的 SC-US 参数:

- 如果当前时刻存在尚未被 $NS_2(v)$ 中的节点选择的通道,则节点 v 在未被选择的通道中随机选择一个通道作为自己的 SC-US 参数。

- 如果当前时刻所有的通道都被选择过,则节点 v 选择一个重用次数最少的通道作为自己的 SC-US 参数。

节点 v 选择了自己的 SC-US 参数后,立即将自己的选择向 $NS_2(v)$ 中的所有节点广播。

广播操作的可靠性会影响到算法的执行效果,文[12,13]给出了提高广播操作可靠性的方法。

SC-US 分配算法的实施效果在于,对于网络中的任意节点 v ,当可用通道数量 NC 不小于 $CD(v)$ 中的节点数量时,集合 $CD(v)$ 中的每个节点都能使用不同的 SC-US 参数;而当 NC 小于 $CD(v)$ 中的节点数量时,所有通道被 $CD(v)$ 中的节点重用次数最大相差 1。通过对 SC-US 参数的选择, $CD(v)$ 被划分成了 NC 个子集,不同子集中的节点在所有的单播时隙都处于不同的操作通道上。当多个通信节点的目的节点分属不同子集时,这些传输可以互不干扰的并发进行, $CD(v)$ 内可实现的最大并发传输数量为 NC 。

3.2.3 自适应传输机制

在网络运行时,网络中各节点对自己和每个 1-跳邻居节点间的所有通道进行实时的通道质量估计。一个理想的通道质量估计器应能对较大的通道质量变化做出快速反应,同时具有良好的稳定性和较小的内存和计算开销。文[14]提出的 WMEWMA 估计器可被用于进行 CHNP 所需的通道质量估计。

根据通道质量估计值,信道被划分为两类:高质量通道和低质量通道。对于网络中的任一节点 v ,都维护着一个专用的通道分类矩阵(CCM),以记录自己和每个 1-跳邻居节点间

所有通道的分类。通道分类矩阵如下式所示:

$$CCM(v) = \begin{bmatrix} c_{00} & c_{01} & \cdots & c_{0n} \\ c_{10} & c_{11} & \cdots & c_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{m0} & c_{m1} & \cdots & c_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, m 等于 $NS_1(v)$ 中的节点数量, n 等于所有可用通道数量 NC , $CCM(v)$ 中的元素 c_{ij} 表示节点 v 与其第 i 个 1-跳邻居节点 w_i 间关于通道 j 的分类值,分类值为 1 时表示高质量通道,为 0 时表示低质量通道。

在每个节点上,到达 MAC 层等待发送的分组按到达时间缓存在一个先进先出(FIFO)发送队列中。节点的分组发送策略如算法 1 所示。在每个时隙,节点从其发送队列 $sQueue$ 的队首开始查找第一个目的节点在当前时隙的操作通道分类值为 1 的分组。如果节点没有查找到满足条件的分组,则节点等待新的满足条件的分组到达;否则,节点从 $sQueue$ 中取出查找到的分组进行发送。

发送节点对于每个发送的分组,要求目的节点返回一个应答帧。如果在设定超时时限内未收到应答帧,则认为分组发送失败。发送节点对发送失败分组的重传计数加 1 后,若该分组的重传计数没有超出协议规定的最大重传次数,则将其暂存到一个发送失败队列 $tfQueue$ 中,所有被转移到 $tfQueue$ 中的分组将失去在当前时隙发送的机会,直到当前时隙结束, $tfQueue$ 中的分组才会被重新转移回 $sQueue$,从而使其能在后继时隙进行重传。对于在当前时隙由于通道质量恶化而发送失败的分组,由于目的节点在后继时隙进行通道切换,可以在另一个高质量通道上进行发送,从而获得更高的传输成功率。

算法 1 自适应传输算法

```

slot begins
while left time in current slot is enough for a transmission
    found_flag = FALSE;
    for each pkt in sQueue /* in FIFO order */
        if (ccm[pkt.dest][op_channel] == 0)
            next pkt;
        else
            found_flag = TRUE;
            break;
    end if
end for
if (found_flag)
    remove pkt from sQueue;
    Transmit pkt using the CSMA/CA algorithm;
    if the ACK was not received before timeout
        pkt.retrans_count++;
        if (pkt.retrans_count ≤ MAX_RETRY)
            insert pkt into tfQueue;
        end if
    end if
else
    wait until new packet arrives or the left time in current slot is not
    enough for a transmission;
end if
end while
remove the packets in tfQueue and reinsert them into sQueue;
slot ends

```

自适应传输算法的效果在于当节点上存在多个等待发送的分组时,在当前时隙最有可能被成功传输的节点能够获得优先发送权,而在当前时隙发送成功率较低的分组则被推迟到后继时隙使其同样能够在一个高质量通道上进行发送。因此,适应性传输算法能够有效地提高网络在较为恶劣的射频环境下的传输成功率,并能在很大程度上减少分组的平均重传次数。

4 性能评估

为测试 CHNP 协议的性能,本文选用 OPNET 网络仿真

工具对 CHNP、CHMA 和以工业监测为目标应用之一的 IEEE 802.15.4 进行了仿真建模和性能比较。仿真配置细节如表 1 所示,其物理层参数的设置参照 CC2420 射频芯片。

表 1 仿真配置

仿真参数		配置
部署区域		100m × 100m
节点数量		100
节点分布		均匀分布
流量模型		随机目的节点
分组长度		50 字节
各节点上的分组到达间隔		独立同指数分布
物理层参数	工作频段	2.4~2.483GHz
(CC2420 芯片)	传输速率	250kbps
	通道数量	4 8 16
	通道间隔	5 MHz
	通信半径	25m

三种协议的吞吐量性能随网络负载的变化曲线如图 3 所示。显然,多通道的 CHNP 协议和 CHMA 协议的吞吐量性能明显优于单通道的 IEEE802.15.4。并且,对于 CHNP 协议,可用通道的数量越多,其所能达到的最高吞吐量越大,这是因为较多的通道意味着较低的竞争强度和碰撞概率。而对于 CHMA 协议,当通道数量由 4 增加到 8 时,其吞吐量性能只有微小的提高。而当通道数量由 8 增加到 16 时,其吞吐量性能基本上没有变化。这说明由于 CHMA 协议中存在的控制通道瓶颈效应问题,限制了可以进行并发传输的通道数量。造成大量的通道无法被充分利用。当网络负载达到 100 分组/秒时,CHNP 协议的吞吐量约为 CHMA 协议的 3 倍。

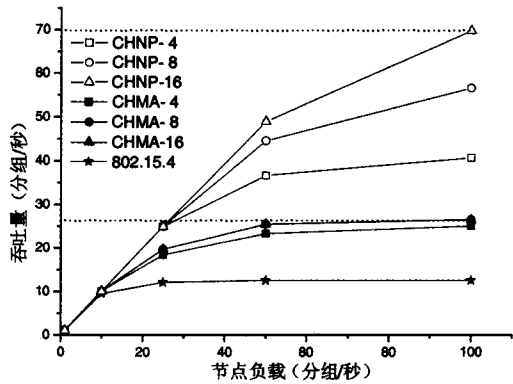


图 3 吞吐量曲线

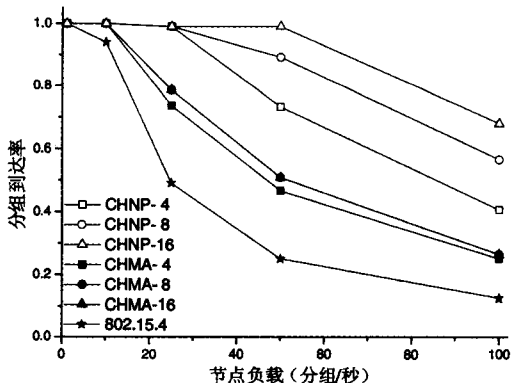


图 4 分组到达率曲线

图 4 比较了三种协议的分组到达率性能。三种协议的到达率随着网络负载的增加存在不同程度的下降,但造成分组到达率下降的原因并不相同。对于 CHNP 协议,到达率下降的主要原因是发送队列溢出,而对于 CHMA 协议和 IEEE802.15.4 协议,除发送队列溢出外,发送碰撞引发的传输失败也是导致到达率下降的主要原因。需要指出的是,由发送队列溢出造成的分组丢失并不消耗能量和带宽,而由发送碰撞所引发的发送失败却包含了大量的能量和带宽开销。

图 5 比较了三种协议的 MAC 层延迟性能。MAC 层延迟度量的是自分组到达当前节点 MAC 层发送队列等待发送,到分组成功被下一跳目的节点 MAC 层接收的时间间隔。在相同的负载下,CHNP 协议的 MAC 层延迟随通道数量的增多而下降,而 CHMA 协议在不同通道数量下的 MAC 层延迟基本上没有变化。

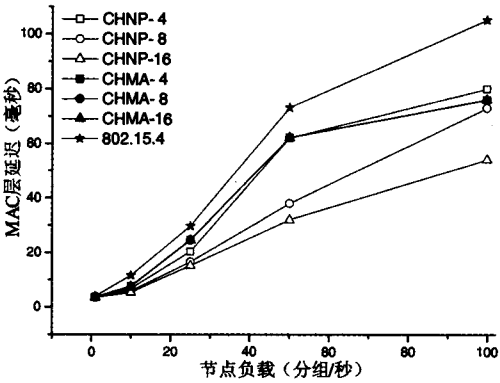


图 5 MAC 层延迟曲线

以上仿真数据是在无外界干扰条件下获得的。为了对协议在干扰条件下的传输可靠性进行分析和比较,我们在仿真中增加了两个同样工作在 2.4GHz 频段的 IEEE802.11 节点作为干扰源,节点的干扰频宽为 22MHz,干扰半径为 100m。两个节点都工作在满负载状态下。图 6 给出了三种协议在有/无干扰条件下的分组到达率对比曲线。对于 CHNP 协议,当负载较低时,外界干扰对分组到达率基本上没有影响,随着负载的升高,干扰条件下的分组到达率比无干扰时有轻微的下降。而对于 CHMA 协议和 802.15.4 协议,与无干扰时相比,干扰条件下的分组到达率下降非常明显,当节点负载达到 100 分组/秒时,这两种协议的分组到达率分别下降到无干扰时的 61% 和 43%。

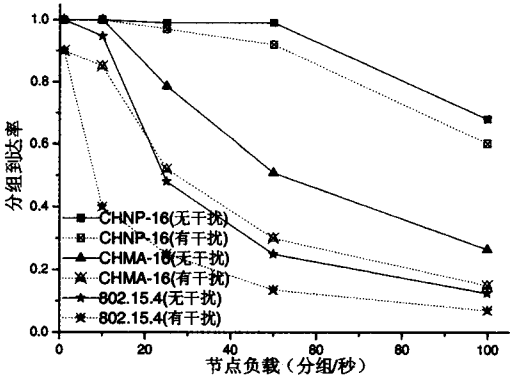


图 6 有/无干扰条件下的分组到达率曲线对比

结论 工业监控是无线传感器网络的重要用途之一,也是无线传感器网络中非常有代表性的一类应用,目前受到日

益广泛的关注。本文提出的 CHNP 协议针对工业应用需求和射频环境特点进行优化,仿真结果表明该协议能够大幅提升网络性能,并具有更好的抗干扰能力。

目前,基于 CC2420 射频芯片的 CHNP 协议实验平台正在开发中。实验平台完成后,我们将在真实的工业射频环境中对协议性能进行综合评估,并根据评估结果对协议进行进一步改进和完善。

参考文献

- 1 Tubaishat M, Madria S. Sensor networks: an overview. *IEEE Potentials*, April 2003, 22(2):20~23
- 2 Tilak S, Abu-gazaleh N B, Heinzelman W. A Taxonomy of Wireless Micro-sensor Network Models. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, April 2002, 6(2): 28~36
- 3 Werb J, Sexton D. Improved quality of service in IEEE 802. 15. 4. In: *International Workshop on Wireless and Industrial Automation*, San Francisco, California, March 7, 2005
- 4 Wu Shih-Lin, Lin Chih-Yu, Tseng Yu-Chee, et al. A new multi-channel MAC protocol with on demand channel assignment for mobile ad-hoc networks. In: *Proc. International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks (ISPAN '00)*, Dallas/Richardson, Texas, USA, December 2000. 232
- 5 Wu Shih-Lin, Lin Chih-Yu, Tseng Yu-Chee, et al. A multi-channel MAC protocol with power control for multi-hop mobile ad-hoc Networks. *The Computer Journal*, 2002, 45(1):101~110
- 6 Hung Wing-Chung, Law K L E, Leon-Garcia A. A dynamic multi-channel MAC for ad-hoc LAN. In: *Proc. 21st Biennial Symposium on Communications*, Kingston, Canada, June 2002. 31~35
- 7 So Jungmin, Vaidya N. Multi-channel MAC for ad hoc networks, handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver. In: *ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, May 2004
- 8 Chen J, Sheu S, Yang C. A new multichannel access protocol for IEEE 802. 11 ad hoc wireless LANs. In: *Proc. of PIMRC Vol 3*, 2003. 2291~2296
- 9 Tzamaloukas A, Garcia-Luna-Aceves J J. Channel-hopping multiple access. In: *Proc. IEEE ICC 2000*, New Orleans, Louisiana, June 2000
- 10 Tzamaloukas A, Garcia-Luna-Aceves J. Channel-hopping multiple access with packet trains for ad hoc networks. In: *Proc. IEEE Device Multimedia Communications (MoMuC'00)*, Tokyo, 2000
- 11 Ye Wei, Heidemann J. Ultra-low duty cycle mac with scheduled channel polling. [Technical Report]. ISI-TR-604. USC/ISI, July 2005
- 12 Vollset E, Ezhilchelvan P. A survey of reliable broadcast protocols for mobile ad-hoc networks. [Technical Report]. CS-TR-792. University of Newcastle upon Tyne, 2003
- 13 Tourrilhes J. Robust broadcast: Improving the reliability of broadcast transmissions on CSMA/CA. In: *IEEE PIMRC*, 1998
- 14 Woo A, Culler D. Evaluation of efficient link reliability estimation for low-power wireless sensor networks. [Technical Report]. UCBCSD-03-1270, U. C. Berkeley Computer Science Division, 2003
- (上接第 15 页)
- 13 Bainbridge W J, Furber S B. CHAIN: A Delay Insensitive CHIP Area INterconnect. *IEEE Micro special issue on Design and Test of System on Chip*, 2002, 142(4):16~23
- 14 Goossens K, Dielissen J, R V adulescu A. Aetheral Network on Chip: Concepts, Architectures, and Implementations. *IEEE Design & Test of Computers*, 2005, 414~421
- 15 Millberg M, Nilsson E, Thid R, et al. The Nostrum backbone - a communication protocol stack for networks on chip. In: *Proceedings of the VLSI Design Conference*, Mumbai, India, January 2004. 693~696
- 16 <http://www.st.com/>
- 17 Adriahtenaina A, Charlery H, Greiner A, et al. SPIN: A Scalable, Packet Switched, On-Chip Micro-Network. In: *Proceedings of the Conference on Design, Automation and Test in Europe: Designers' Forum*, March 03-07, 2003. 20070~20073
- 18 Saastamoinen I, Alho M, Pirttimäki J, et al. Proteo interconnect IPs for networks-on-chip. In: *Proc. IP Based SoC Design*, Grenoble, France, 2002. 6p
- 19 Dally W J, Towles B. *Principles and Practices of Interconnection Networks*. Morgan Kaufmann, 2004
- 20 Bjerregaard T, Mahadevan S. A survey of research and practices of network-on-chip. *ACM Computing Surveys*, 2006, 38(1):1~54
- 21 Dehyadgari M, Nickray M, Afzali-kusha A, et al. A New Protocol Stack Model for Network on Chip. In: *Proceedings of the 2006 Emerging VLSI Technologies and Architectures (ISVLSI'06)*, IEEE, 2006. p2
- 22 Kumar S, Jantsch A, Soininen J-P, et al. A network on chip architecture and design methodology. In: *Proc. Int's Symp. VLSI (ISVLSI)*, 2002. 117~124
- 23 Theis T N. The future of interconnection technology. *IBM Journal of Research and Development*, May 2000, 44(3):379~390
- 24 Plana L A, Bainbridge W J, Furber S B. The design and test of a smartcard chip using a CHAIN self-timed network-on-chip. In: *Proceedings of the Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition*, volume 3. February 2004. 274~279
- 25 Bolotin E, Cidon I, Ginosar R, et al. QNoC: QoS architecture and design process for network on chip. *Journal of Systems Architecture*, special issue on Network on Chip, February 2004, 50: 105~128
- 26 Ahonen T, Tortosa D S, Nurmi J. Topology optimization for application-specific networks-on-chip. In: *Proc. 6th International Workshop on System Level Interconnect Prediction*, Paris, France, 2004. p8
- 27 Pande P P, Grecu C, Ivanov A, et al. Switch-based interconnect architecture for future systems on chip. In: *Proc. SPIE, VLSI Circuits and Systems*, vol 5117, 2003. 228~237
- 28 Dehyadgari M, Nickray M, Afzali-kusha A, et al. Evaluation of Pseudo Adaptive XY Routing Using an Object Oriented Model for NOC. In: *The 17th International Conference on Microelectronics*, 13 - 15 December 2005. 204~208
- 29 Hu J, Marculescu R. DyAD - smart routing for networks-on-chip. In: *Proc. 41'st ACM/IEEE Design Automation Conf*, San Diego, CA, 2004. 260~263
- 30 Guerrier P, Greiner A. A scalable architecture for system-on-chip interconnections. In: *Proc. Sophia Antipolis Forum on MicroElectronics (SAME)*, Sophia Antipolis, France, 1999. 90~93
- 31 Ye T, Benini L, De Micheli G. Packetization and routing analysis of on-chip multiprocessor networks. *Journal of Systems Architecture*, 2004, 50 (2-3):81~104
- 32 Taylor M B, Kim J, Miller J, et al. The Raw Microprocessor: A Computational Fabric for Software Circuits and General-Purpose Programs. *IEEE Micro*, Mar 2002. 25~35
- 33 Wiklund D, Liu Dake. SoCBUS: Switched Network on Chip for Hard Real Time Embedded Systems. In: *Proceedings of the International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'03)*, IEEE, 2003. p8
- 34 Marescaux T, Rangevall A, Nollet V, et al. Distributed congestion control for packet switched networks on chip. In: *Parallel Computing Conference (ParCo'05)*, Proceedings, Malaga, Spain, September 2005. 760~768
- 35 Lu Zhonghai, Thid R, Millberg M, et al. NNSE: Nostrum network-on-chip simulation environment. In: *Swedish System-on-Chip Conference (SSoCC'03)*, April 2005. 1~4
- 36 Bjerregaard T. The MANGO Clockless Network-on-Chip: Concepts and Implementation. [PhD thesis]. Technical University of Denmark, 2005
- 37 Ykman-Couvreur Ch, Nollet V, Marescaux Th, et al. Pareto-based application specification for MP-SoC customized run-time management. In: *Proceedings of the International Conference on Embedded Computer Systems: Architectures, MOdeling, and Simulation (SAMOS)*, Samos, Greece, July 2006. 78~84