

精准农业无线传感器网络协议研究

杨金凤¹, 王骥^{2,3}

(1. 广东文理职业学院信息工程系, 广东 湛江 524088; 2. 广东海洋大学电子与信息工程学院, 广东 湛江 524088;
3. 广东省智慧海洋传感网及其装备工程技术研究中心, 广东 湛江 524088)

摘要: 精准农业无线传感器网络 (PAWSN, precision agriculture wireless sensor network) 是一个全新的研究领域, PAWSN 与智慧农业的发展进程密切相关, 引起了该领域学者的关注。首先, 分析了 PAWSN 的关键技术。然后, 根据关键技术的本质和特征进行了分类, 并根据分类框架详细阐述了 PAWSN 关键技术中最重要的网络协议即介质访问控制 (MAC, media access control) 协议与路由协议的优缺点。最后, 指明了 PAWSN 协议亟待解决的问题与解决思路。所提方案的研究目的在于为 PAWSN 协议跨层集成优化设计提高 PAWSN 整体性能提供思路, 进而提高 PAWSN 在智慧农业中的使用率, 最终推动智慧农业的发展。

关键词: 无线传感器网络; 精准农业; 路由协议; 介质访问控制协议; 跨层设计

中图分类号: TP393.1

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2020.00189

Research of precision agriculture WSN protocols

YANG Jinfeng¹, WANG Ji^{2,3}

1. Department of Information Engineering, Guangdong Institute of Arts and Sciences, Zhanjiang 524088, China
2. College of Electronics and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China
3. Research Center of Guangdong Smart Oceans Sensor Networks and Equipment Engineering, Zhanjiang 524088, China

Abstract: The precision agriculture wireless sensor network (PAWSN) is a new research field. PAWSN is related to the development process of the smart agriculture, which has attracted the attention of scholars in the smart agriculture field. The key technology of PAWSN was analyzed, and then was classified according to its nature and characteristics, with detailed description of the merit and demerit of MAC layer protocol and routing protocol which was the most important network protocol of PAWSN key technology based on the classification framework. Finally, the problems needed to be solved and the solution ideas of PAWSN network protocol were pointed out. This study was aimed to make a cross-layer integrated optimization design for the PAWSN network protocol, improve the whole performance and the utilization ratio of PAWSN in smart agriculture, and promote the development of smart agriculture.

Key words: wireless sensor network (WSN), precision agriculture, routing protocol, media access control protocol, cross-layer design

收稿日期: 2020-03-09; 修回日期: 2020-05-29

通信作者: 王骥, zjouwangji@163.com

基金项目: 广东省创新强校重点项目 (No.GDOU2017052602); 广东省普通高校重点领域专项——新一代信息技术 (No.2020ZDZX3008); 广东普通高校人工智能领域专项重点项目 (No.2019KZDX1047); 广东大学生科技创新培育专项资金项目 (No.PDJH2020A0270)

Foundation Items: The Key Projects of Innovative and Strong Schools in Guangdong Province (No.GDOU2017052602), The Special Projects in Key Areas of Ordinary Colleges and Universities in Guangdong Province (New Generation of Information Technology) (No.2020ZDZX3008), The Special Key Projects in the Field of Artificial Intelligence in Guangdong Ordinary Universities (No.2019KZDX1047), The Guangdong University Student Science and Technology Innovation Packing Fund Project (No.PDJH2020A0270)

1 引言

随着农业工程和信息技术的迅速发展,使得农业的生产条件得到明显改善,同时也给农业环境带来了巨大的负面影响。在此背景下,20世纪80年代精准农业被美国农业部提出。按照信息技术发展前沿状态可定义为遥感(RS, remote sensing)技术、地理信息系统(GIS, geographic information system)、全球定位系统(GPS, global positioning system)、物联网(IoT, Internet of things)、人工智能以及大数据等战略新兴技术与现代农业的结合,将农业生产精细化,最终实现农业工程信息化、科学化,农业生产高效化、环保化^[1-3]。但受限于信息技术发展状态,该领域理论研究与工程化进程一直进展缓慢,而随着IoT技术的兴起,特别是其核心技术——无线传感器网络(WSN, wireless sensor network)的出现,有效地弥补了这一不足。

为了便于研究,将用于精准农业的无线传感器网络定义为PAWSN。目前,国内外对PAWSN的研究主要集中在时钟同步、数据融合、节点定位、节能、网络协议等方面,其中网络协议是PAWSN数据通信最重要的关键技术,主要包括网络层(NWK, network layer)与MAC协议,网络性能优劣主要取决于两个协议的优化程度,本文主要针对MAC协议与路由协议分析PAWSN协议的进展状态。

2 MAC协议

由于传感器节点受资源限制,为了增加PAWSN的工作时长,MAC协议在满足需求的情况下,以减少能耗、最大化生命周期为其主要设计任务。传统领域的WSN实时性、吞吐量及带宽利用率等性能大多为次要设计任务,而PAWSN有其特殊性,即环境信息变化缓慢,对数据的实时性要求不高。因此,在网络设计时除了能量效率这一指

标外,其他指标一般可以不作为设计的关键目标,除非重叠部署PAWSN。农业信息化领域的学者针对传感器网络农业工程应用场景,提出了很多MAC协议,按照工作方式划分,典型的分类为竞争型MAC协议、分配型MAC协议和混合型MAC协议^[4-5]。

2.1 竞争型MAC协议

适合农业传感器网络的竞争型MAC协议是S-MAC(sensor MAC)协议与TMAC(timeout MAC)协议,S-MAC协议由Wei等^[6]提出,其核心思想是通过周期性侦听节点的活跃状态调节节点休眠时间,从而降低网络能量的消耗;利用虚拟簇使同簇节点的休眠周期大体一致,节约了空闲侦听的时间;利用虚拟载波侦听机制和物理信道指令,解决信息碰撞、串扰等一系列问题,信息分割和改进(RTS/CTS, request to send/clear to send)指令使得传输效率有很大的提高。总之,S-MAC协议通过周期性睡眠调度与空闲侦听机制明显降低了系统功耗,应用在PAWSN中实现了节能目标。由于帧长和占空比固定,且帧长取决于时延和缓存,当网络负载小时,空闲侦听周期过长会造成明显的传输时延,对于对实时性有要求的应用场景来说,S-MAC协议不能满足其要求,但经过针对性优化后该协议非常适合用于PAWSN。T-MAC协议是在S-MAC协议的基础上,为了解决S-MAC协议采用固定的调度周期导致不适应网络流量变化问题而提出的^[7-8]。S-MAC协议和T-MAC协议的基本机制如图1所示,上面部分的信息流表示节点一直处于侦听方式下的消息收/发序列,下面部分的信息流表示采用S-MAC/T-MAC协议时的消息收/发序列,T-MAC协议相对于S-MAC协议减少了活动时间。T-MAC协议可根据流量状况改善数据传递性能,从而使其更适用于关键任务应用,并且提高了能效性能,相比S-MAC协议,在PAWSN实验中测定能效性能提高达69%。后续研究以T-MAC协议和S-MAC协议

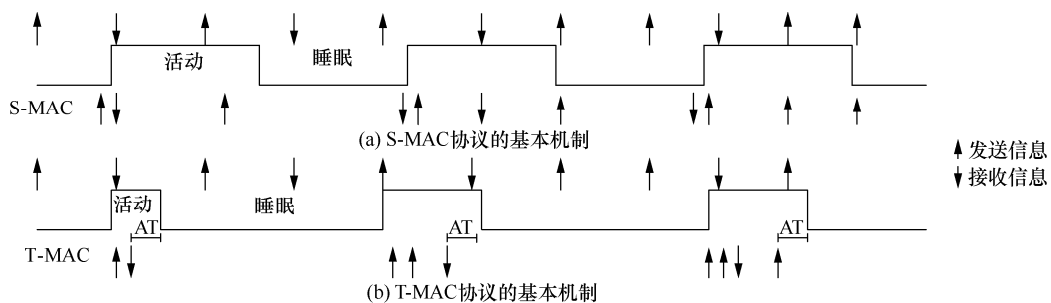


图1 S-MAC协议和T-MAC协议的基本机制

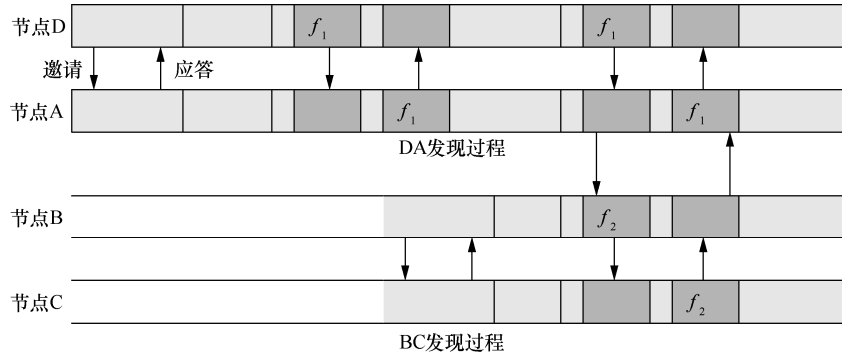


图2 SMACS 协议链路建立过程

为基础，产生了很多经典成果。其中，最经典的成果是由 Gayatri 和 Vidushi^[9]提出的基于能量高效的竞争型 ADMC-MAC 协议。该协议优先选择簇头，簇头在队列中处理的分组数量最高，在形成虚拟簇中具有最大的能量，使用回归技术计算节点的流量和剩余能量来确定选用节点的占空比。

2.2 分配型 MAC 协议

适合野外场景监测的 WSN 分配型 MAC 协议主要有 D-MAC 协议、SMACS 协议、CA-TDMA 协议^[10]。这些协议的共性特点是通常采用频分多址 (FDMA, frequency division multiple access)、时分多址 (TDMA, time division multiple access)、码分多址 (CDMA, code division multiple access) 等将单个物理信道分割为多个子信道，通过动态或者静态的方式把子信道分配给通信节点，从而避免出现冲突。分配型 MAC 协议具有无冲突、易于休眠、低功耗等优点^[11]。

D-MAC (data-gathering MAC) 协议^[12]是针对竞争型 MAC 协议中的 S-MAC 协议和 T-MAC 协议的数据转发中断问题而提出的，其核心思想是将多源数据汇聚到一个 sink 节点，数据传输的路径都包含在一个树状拓扑结构中，利用占空比和数据树深度交替调度节点睡眠周期，解决了数据多跳传输的时延问题。D-MAC 协议是在一些假设的基础上被提出的，因此在一定程序上限制了它的应用，但以数据为中心的设计理念非常适用于 PAWSN 领域；SMACS (self-organizing medium access control for sensor network) 协议是基于固定信道分配并结合 TDMA 和 FDMA 完成网络建立和通信链路组织的 MAC 协议，利用每对邻居节点分配特有的频率消除不同节点之间的频率干扰，从而避免出现节点之间数据碰撞^[13]。SMACS 协议通过共享信道广播“邀请”信息建立链路，

满足 PAWSN 固定场景的应用需求，SMACS 协议链路建立过程如图 2 所示。CA-TDMA 协议通过对超帧中竞争时隙的直接分配和数据时隙的相互申请实现在整个网络中无时隙竞争，并且通过添加新的申请消息和提出新的时隙竞争、时隙续约和时隙交换机制提高整体网络的性能^[14]，其中申请消息包括 RTS、CTS、单击通过率 (CTR, click-through-rate)。在时隙竞争与数据发送时期，分别由 M 个竞争时隙和 N 个数据时隙组成，并且 $N < M$ ，而竞争时隙仅有一个，很好地解决了网络时延问题，CA-TDMA 协议超帧格式如图 3 所示。

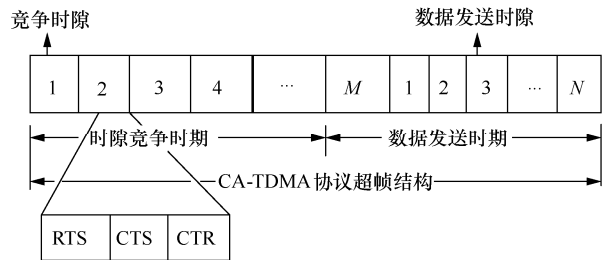


图3 CA-TDMA 协议超帧格式

2.3 混合型 MAC 协议

混合型 MAC 协议是基于竞争型 MAC 协议和分配型 MAC 协议的优点而设计的，典型的协议包括 Hanefi 等^[15]基于混合 TDMA 与 FDMA 技术使用双无线电与多信道通信提出的一种新的混合多信道分配 (HMCAWSN, hybrid multi-channel allocation for WSN) 类型，在大规模 PAWSN 环境中应用，数据分组传输效率高且稳定。陈贤明等^[16]提出基于分簇的、不同相位调度表的 MAC 协议，簇内节点采用不同相位的调度表，减少冲突概率和串音问题，同时通过协同传输方法传输数据，提高了数据传输效率。李哲涛等^[17]提出一种状态轮换分组的 MDD-MAC (multi-divided deliver MAC) 协议，将数据的发送和接收分开进行，减

表1 PAWSN 常用的网络 MAC 协议及其实现算法共性优缺点

MAC 协议	接入方式	同步要求	吞吐量	适应性	时延	信道利用率	可延展性
S-MAC	竞争	不需要	较好	较好	一般	较好	好
T-MAC	竞争	不需要	好	较好	一般	较好	好
ADMC-MAC	竞争	不需要	较好	较好	较好	较好	好
D-MAC	分配	高	一般	差	好	较好	一般
SMACS	分配	高	好	差	好	较好	一般
CA-TDMA	分配	高	较好	差	好	较好	一般
Z-MAC	混合	低	好	好	好	较好	一般

少碰撞和串音，并结合网络拓扑信息，实现节点分组状态轮换。

以上协议在 PAWSN 中得到了广泛应用，在农业实际工程中有效改善了 PAWSN 的网络时延，降低了能耗。大部分协议是针对减少冲突概率、降低数据传输时延而设定的。PAWSN 常用的网络 MAC 协议及其实现算法共性优缺点如表 1 所示。

3 路由协议

在 PAWSN 中，网络协议的另一个研究热点是实现农业场景的网络节点间的有效通信以及数据可靠传输的关键技术——路由协议。受农业工程环境限制，延长整个网络的生命周期仍然是路由协议设计的重要目标之一，同时根据工程应用特点，以数据为中心形成消息的转发路径与地理位置因素成为其路由协议设计的关键因素。根据网络特点，路由协议主要分为 4 种类型，包括以数据为中心的路由协议、集群路由协议、能量感知路由协议和地理位置路由协议^[18]。

3.1 以数据为中心的路由协议

在以数据为中心的 PAWSN 路由协议中，sink 节点通常向某一区域发出数据请求询问后，等待该区域中的传感器节点传送数据。SPIN (sensor protocol for information via negotiation) 协议^[19]是最早以数据为中心的代表，Flooding 协议^[20]和 Gossiping 协议^[21]是 WSN 中较经典的两个以数据为中心的路由协议。在 Flooding 协议中，节点广播数据分组直到过期分组丢失或到达目的节点，Flooding 协议和 Gossiping 协议如图 4 所示。Flooding 协议不需要路由和拓扑维护信息，但是应用在 PAWSN 中存在内爆（节点同时接收多个邻居节点发送的同一份信息）、重叠（同一个节点收到的一组数据中有相同的数据分组）以及资源盲目利用

（节点不考虑资源有限，任何情况下都广播数据）的情况；Gossiping 协议是对 Flooding 协议的改进，节点收到数据分组后随机选择邻居节点为下一跳路由节点，如图 4 所示。Gossiping 协议在 PAWSN 应用中有效避免出现内爆问题，但是重叠与资源盲目利用问题没有得到解决，同时还增加了数据聚合过程中的时延与能耗。

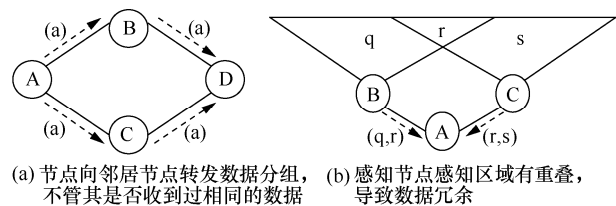


图4 Flooding 协议和 Gossiping 协议

SPIN 协议使用协商机制来解决 Flooding 协议和 Gossiping 协议中的内爆和重叠问题。通过抽象的元数据命名机制减少了一半的数据冗余，握手式的数据传递机制避免出现数据盲目转发现象，从而有效节约了能量消耗，SPIN 路由协议建立与消息传递机制如图 5 所示。当 A 节点有新的数据时，广播一个 ADV 数据分组，需要这个数据分组的相邻节点用 REQ 消息提出请求，数据以 data 格式发送到请求节点。需要说明的是，在 PAWSN 中，仿真 SPIN 协议数据传输的可靠性差，需要优化网络通信能力。

定向扩展 (DD, directed diffusion) 路由协议使用梯度矢量信息表示固定数据的需求方向，利用迭代优化算法基于兴趣扩散 (interests)、梯度建立 (gradients)、路径加强 (reinforcement) 等机制在源节点和目的节点间建立一条最佳路径，DD 路由协议路由机制如图 6 所示。该协议的优点是实现了数据高速缓存、融合以及按需查询工作模式，实现了在不需维护网络全局拓扑信息情况下的能量高效利用，但是仿真实验证明，其不适用于连续查询

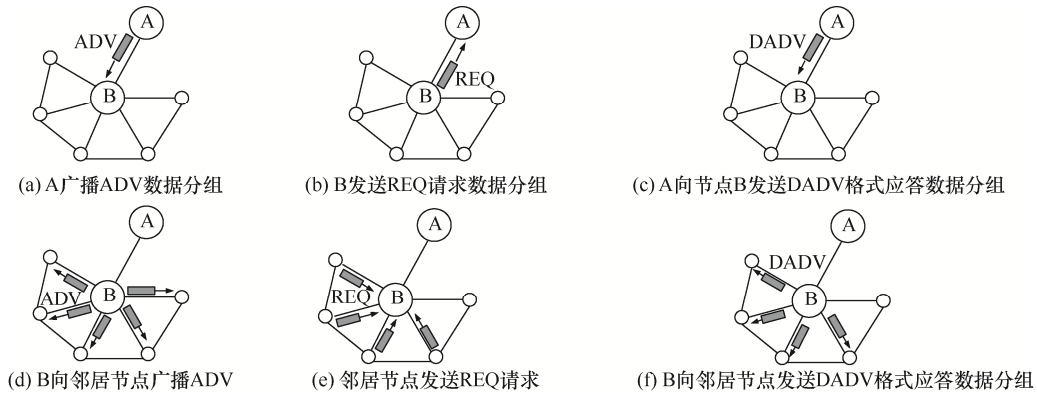


图5 SPIN路由协议建立与消息传递机制

与事件驱动两种工作模式，这在某种程度上弱化了其在 PAWSN 中的应用。

3.2 集群路由协议

集群结构路由协议实际是针对分层结构的网络，网络按照功能或规模等因素划分为多个簇，每个簇由一个簇头和簇成员组成，簇头可以形成高一级网络，在高一级网络中，可以再次分簇，形成更高一级网络，以此类推。簇头负责管理簇内节点、收集和融合簇内信息与簇间数据的转发。集群路由协议具有很好的扩展性，经过一定修改也非常适合大规模的 PAWSN 应用。

LEACH (low energy adaptive clustering hierarchy) 协议是由 Heinzelman 等^[22]于 2000 年提出的分层路由算法，以循环的方式随机选择簇头节点，将整个网络的能量平均分配到每个传感器节点中，从而达到网络能源消耗平衡、提高网络整体生存时间的目的。实验结果证明，相比于平面多跳和静态分层算法，LEACH 分簇协议可以将网络生命周期延长 15%。TEEN 协议^[23]是由 LEACH 协议发展而来的，该协议也是一个基于簇群的路由协议，区别在于其定义了硬阈值和软阈值两个概念。其中，硬阈值是指被检测数据不能超过的阈值；软阈值是指被检测数据的变动范围。除路由时间以外，节点都会关闭发射功能以节约能量。江冰等^[24]提出

PAWSN 混合式的分簇路由 (HCRA) 算法，簇形成后固定，簇之间的通信仅局限于同一个扇形下的相邻簇之间，这样就减少了簇头重构、数据传输能耗与通信距离。仿真结果表明，HCRA 算法的生命周期及通信距离优于 HEED 算法和 LEACH 算法，将 HCRA 算法应用于 PAWSN 有效提高了数据分组投递率，延长了网络生命周期。Sonam 和 Vinod^[25]基于监测农业区域节点使用静态分簇方法，利用基于敏感阈值的路由协议将监测的数据传输到基站。该协议使用模糊逻辑控制技术选择最佳的簇头，使每个数据传输周期中节点的能耗最小。

3.3 能量感知路由协议

能量路由是最早被提出的 WSN 路由机制之一，根据节点的可用能量 (PA, power available) 或传输路径上的能量需求，选择数据的转发路径，节点可用能量就是节点当前的剩余能量，能量路由算法示意图如图 7 所示。用于 PAWSN 最典型的能量感知路由协议主要包括：1) 最大 PA 路由，如图 7 所示的路径 4，虽然路径 2 的 PA 之和最大，但不是最高效的；2) 最小能量消耗路由，如图 7 所示的路径 1；3) 最少跳数路由，如图 7 所示的路径 3；4) 最大、最小 PA 节点路由如图 7 所示的路径 3。农业的野外恶劣环境对能量要求高，所以能量感知路由协议未来在农业环境中是一个具有很好应用

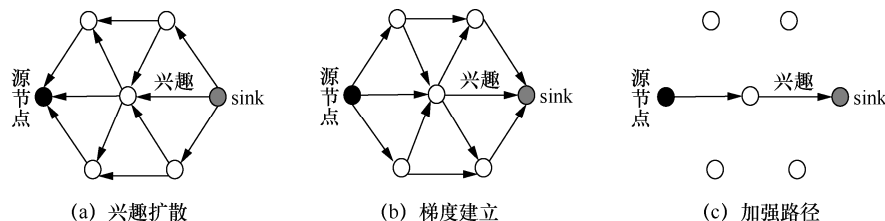
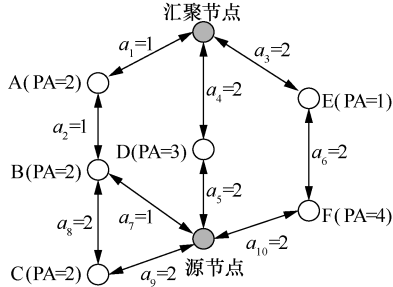


图6 DD路由协议路由机制

前景的协议。典型的是 Darabkh 等^[26]提出基于能量感知和分层的群集路由协议，该协议工程应用于 PAWSN，缩短了节点间的通信距离，减少了簇建立以及簇内外数据传输所需的通信开销。



从源节点到汇聚节点，有以下可能的路径。
 路径1：源节点→B→A→汇聚节点，路径上所有节点PA=4，发送分组需要能量之和为3。
 路径2：源节点→C→B→A→汇聚节点，路径上所有节点PA=6，发送分组需要能量之和为6。
 路径3：源节点→D→汇聚节点，路径上所有节点PA=3，发送分组需要能量之和为4。
 路径4：源节点→F→E→汇聚节点，路径上所有节点PA=5，发送分组需要能量之和为6。

图7 能量路由算法示意图

3.4 地理位置路由协议

在大面积精准农业环境监测中，通常需要获取节点的位置信息，这样采集的数据才有意义。经典的位置路由协议是位置和能量感知的地理路由 (GEAR, geographical and energy aware routing) 协议和虚拟极坐标 (GEM, graph embedding) 协议；GEAR 机制根据事件区域的地理位置信息，利用贪婪算法建立汇聚节点到事件区域的优化路径^[27]。贪婪算法通过节点之间的周期性相互交换 hello 信息分组来记录邻居节点的位置信息，适用于节点运算和存储能力有限的 PAWSN 工程应用。GEM 协议是一种适用于数据中心存储方式的、基于地理位置的路由协议，其基本思想是建立一个虚拟极坐标系统来表示实际的网络拓扑结构^[28]。

地理位置路由路径与下一跳节点选择算法简单，但不适合用于拓扑结构不固定与位置信息感知算法复杂的场景。PAWSN 常用的路由协议对比如表 2 所示。

由表 2 得知 PAWSN 路由算法特点如下：1) 能适应通信量和网络拓扑的变化，即自适应性。2) 路由选择算法需要衡量每一条链路的费用或代价。如链路长度、数据传输速率、链路容量、是否要保密、传播时延等，甚至可以是一天中某一个小时内的通信量、节点的缓存被占用的程度、链路差错率等。在不同 PAWSN 工程场景下，各种因素的权值不同。3) 采用分层次的路由选择协议。PAWSN 规模非常大，智慧农业要求的数据量大，节点数量多，路由表复杂，而路由器之间交换路由信息所需的带宽就可能使网络的通信链路饱和，所以 PAWSN 特别需要优化的路由算法与之配套。

4 结束语

本文研究了适用于 PAWSN 的 MAC 协议与 NWK 协议，设定的目标主要包括两方面：其一，设计面向 PAWSN 专有的协议；其二，MAC 协议与 NWK 协议集成设计，后者是未来发展的趋势。按照跨层通信协议设计的目的性划分，网络通信协议可以分为以优化互操作性和增强网络适应性为目的的跨层设计协议、以优化部分性能标准为目的的跨层设计和无分层模型设计。按照一体化设计标准对比 MAC 协议与 NWK 协议，两者的共性概括为如下 4 方面。

1) 能量优先。PAWSN 中节点的能量有限，延长整个网络的生命周期成为传感器网络协议设计的重要目标之一，因此，需要考虑节点的能量消耗以及网络能量均衡使用的问题。

2) 局部拓扑信息。PAWSN 节点存储资源和计

表 2 PAWSN 常用的路由协议对比

路由协议	分类	移动性	能耗	数据聚集	定位	复杂性	可延展性
SPIN	平面	可能	有限	有	无	低	有限
DD	平面	有限	有限	有	有	低	有限
LEACH	分层	簇头固定	簇头高	有	有	由簇头维护	好
TEEN	分层	簇头固定	簇头高	有	有	非常简单	好
HCRA	分层	簇头固定	簇头高	有	有	低	好
ECFP	分层	簇头固定	簇头高	有	有	低	较好
GEAR	位置	有限	有限	无	无	低	有限
GEM	位置	有限	有限	无	无	低	好

算资源的能力有限,而且在节点只能获取局部拓扑信息的情况下,设计高效、简单的优化协议及其实现机制是关键的技术问题。

3) 以数据为中心。PAWSN 的数据流一般是由多个传感器节点汇聚到 sink 节点,按照对感知数据的需求、数据通信模式和流向,以数据为中心形成消息的转发路径。

4) 与应用相关。PAWSN 的应用环境千差万别,数据通信模式也不同。优化的协议都是针对每一个具体应用的需求适应好的特定协议。

目前,WSN 在精准农业中的应用广泛,PAWSN 协议的研究已经取得大量成果,根据本文的研究观点,亟待解决的问题主要集中在以下 3 方面。

1) 现有的网络协议过于理想化,大多停留于仿真实验阶段,源于实践与工程场景中的成果几乎空白。另外,部分应用于 PAWSN 的协议也缺乏工程化检验与优化。

2) 现有的网络协议无论是 MAC 协议还是 NWK 协议,在节能和时延性能之间,都存在不同程度的矛盾性和复杂性,缺乏在整体性能方面表现优良的网络协议,特别是面向工程的整体综合性能优化的协议少之又少。

3) 目前,WSN 通用化网络协议颇多,缺乏专用于 PAWSN 的网络协议,导致 PAWSN 理论与工程化过程必须根据 WSN 通用协议的需求针对农业环境进行修改、优化与升级,使其真正与 PAWSN 匹配。

在农业工程领域中,PAWSN 是农业物联网关键技术的核心,特别是其网络协议的优化程度决定了智慧农业的高度与深度。所以,未来 PAWSN 协议的研究方向是面向工程设计兼顾网络整体性能优化的专用协议,主要方法是跨层优化技术的研究。即将网络 NWK 协议与 MAC 协议结合作为一个整体进行设计,实现相邻层功能跨层结合优化,形成一个大而且功能全的新协议大层,达到网络模型简化、能耗减少、整体性能最优的目的。

参考文献:

- [1] 赵春江, 薛绪掌, 王秀, 等. 精准农业技术体系的研究进展与展望[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 7-12.
ZHAO C J, XUE X Z, WANG X, et al. Research progress and prospects of precision agricultural technology systems[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(4): 7-12.
- [2] 刘爱民, 徐丽明. 现代精准农业及我国精准农业的发展方向[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(2): 20-25.
- LIU A M, XU L M. Modern precision agriculture and the development direction of precision agriculture in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(2): 20-25.
- [3] DANIEL C, ROSALBA C, JOSÉ M A. Chapter 3.3-hyperspectral imaging in crop fields: precision agriculture[M]. Netherlands: Elsevier Science & Technology, 2020.
- [4] YAN H, YAN Z, PANG Z, et al. Superframe planning and access latency of slotted MAC for industrial WSN in IoT environment[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(2): 1242-1251.
- [5] 董颖, 周占颖, 苏真真, 等. 基于路由信息的无线传感器网络跨层 MAC 协议[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(2): 647-654.
DONG Y, ZHOU Z Y, SU Z Z, et al. A cross-layer MAC protocol for wireless sensor networks based on routing information[J]. Journal of Jilin University: Engineering Science, 2017, 47(2): 647-654.
- [6] WEI Y, HEIDEMANN J, ESTRIN D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(3): 493-506.
- [7] MESSAOUD D, DJAMEL D, NADJIB B, et al. Synchronous contention-based MAC protocols for delay-sensitive wireless sensor networks: a review and taxonomy[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2014, 38: 172-184.
- [8] 李晓. 无线体域网传输协议研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2014.
LI X. Research on wireless body domain network transmission protocol[D]. Yantai: Yantai University, 2014.
- [9] GAYATRI S, VIDUSHI S. ADMC-MAC: energy efficient adaptive MAC protocol for mission critical applications in WSN[J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2019, 23: 21-28.
- [10] WANG J, REN X L, CHEN F J, et al. On MAC optimization for large-scale wireless sensor network[J]. Wireless Networks, 2016, 22(8): 1877-1889.
- [11] WILSON N D, GANESH R, JOSEPH K, et al. Packet CDMA versus dynamic TDMA for multiple access in an integrated voice/data PCN[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 11(6): 870-884.
- [12] KEBKAL O, KOMAR M, KEBKAL K, et al. D-MAC: media access control architecture for underwater acoustic sensor networks[C]// Oceans. IEEE, 2011.
- [13] 高伟. 无线传感器网络流量自适应低能耗 TAEE-MAC 协议研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
GAO W. Traffic adaptive low power TAEE-MAC protocol for wireless sensor networks[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009.
- [14] 任昊翔, 郭达伟, 邵凝宁, 等. 一种新型的无竞争的基于 TDMA 的 MAC 协议[J]. 传感技术学报, 2013, 26(1): 89-94.
REN H X, GUO D W, SHAO N N, et al. A new contention-avoid TDMA-based MAC protocol[J]. Journal of Transduction Technology, 2013, 26(1): 89-94.
- [15] HANEFI C, MUSA C, ISMAIL E. HMCAWSN: a hybrid multi-channel allocation method for erratic delay constraint WSN applications[J]. Computer Standards & Interfaces, 2019, 65: 92-102.
- [16] 陈贤明, 蔡跃明, 杨文东, 等. WSN 中一种基于协作休眠的 MAC 协议[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(3): 547-551.
CHEN X M, CAI Y M, YANG W D, et al. A cooperative sleep-based MAC protocol in WSN[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(3): 547-551.
- [17] 李哲涛, 王志强, 朱更明, 等. WSN 中状态轮换分组的数据收集

- MAC 协议[J]. 计算机研究与发展, 2014, 51(6): 1167-1175.
- LI Z T, WANG Z Q, ZHU G M, et al. Data collection MAC protocol for state rotation grouping in WSN[J]. Computer Research and Development, 2014, 51(6): 1167-1175.
- [18] 杨浩, 王喜玮. 基于区域化压缩感知的无线传感器网络数据收集方法[J]. 计算机学报, 2017, 40(8): 1933-1945.
- YANG H, WANG X W. Data collection method for wireless sensor networks based on regionalized compressed sensing[J]. Chinese Journal of Computers, 2017, 40(8): 1933-1945.
- [19] 毛科技, 赵小敏, 宦若虹, 等. 基于散列值的以数据为中心路由协议[J]. 传感技术学报, 2010(9): 102-110.
- MAO K J, ZHAO X M, TONG R H, et al. Data-centric routing protocol based on Hash value[J]. Journal of Transduction Technology, 2010(9): 102-110.
- [20] HEDETNIEMI S, LIESTMAN A. A survey of gossiping and broadcasting in communication network[J]. Network, 1988, 18(4): 319-349.
- [21] 侯蓉晖, 史浩山, 杨少军. 一种无线传感器网络以数据为中心的QoS路由协议[J]. 传感技术学报, 2006, 19(6): 2732-2737.
- HOU R H, SHI H S, YANG S J. A data-centric QoS routing protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Transduction Technology, 2006, 19(6): 2732-2737.
- [22] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]//The 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. 2000.
- [23] ABBAS N, HAMID S-A. Performance modeling of the LEACH protocol for mobile wireless sensor networks[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2011, 71(6): 812-821.
- [24] 江冰, 毛天, 唐大卫, 等. 基于农田无线传感网络的分簇路由算法[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 182-187.
- JIANG B, MAO T, TANG D W, et al. Clustering routing algorithm based on farmland wireless sensor network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(16): 182-187.
- [25] SONAM M, VINOD K J. Fuzzy based energy efficient sensor network protocol for precision agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 130: 20-37.
- [26] DARABKH K A, AL-MAAITAH N J, JAFAR I F, et al. EA-CRP: a novel energy-aware clustering and routing protocol in wireless sensor networks[J]. Computers & Electrical Engineering, 2017: 702-718.
- [27] 宁健. 物联网环境下油田无线网络路由协议分析[J]. 信息系统工程, 2014(2): 86.
- NING J. Analysis of oilfield wireless network routing protocol in Internet of things environment[J]. Information Systems Engineering, 2014(2): 86.
- [28] 王骥, 余建平. 无线传感器网络——原理、技术与应用[M]. 吉林: 吉林大学出版社, 2018.
- WANG J, YU J P. Wireless sensor network—principles, technology and application[M]. Jilin: Jilin University Press, 2018.

[作者简介]



杨金凤(1995-), 女, 广西玉林人, 广东文理职业学院信息工程系助教, 主要研究方向为无线传感器网络与智慧农业。



王骥(1972-), 男, 辽宁建昌人, 广东海洋大学教授, 主要研究方向为智慧海洋传感网与农业物联网。