

面向应急监控的无线传感器网络跨层通信设计*

曾园园^{1a}, 项 慨^{1b,2†}

(1. 武汉大学 a. 电子信息学院; b. 计算机学院, 武汉 430072; 2. 湖北经济学院 信息管理学院, 武汉 430205)

摘要: 面向应急监控应用的无线传感器网络的通信面临着由于网络拓扑的动态性和时变性,以及应急灾难事件突发区域数据量剧增而造成的网络数据传输冲突严重等问题。针对这些问题,提出一种融合物理层功率控制、MAC层的链路调度和网络层路由的跨层通信设计思路,分别给出了集中式和分布式算法,以实现面向应急场景的实时、健壮且低干扰的数据通信。采用 NS2 进行模拟,实验结果表明提出的算法在应急监控应用中,随着设定灾难模型蔓延和扩大以及数据源增加的情况下,都具有良好的数据投递率、实时性和能量效率;提出的机制适用于各类型灾难应急场景,与同类研究相比具有其优越性。

关键词: 无线传感器网络; 通信设计; 跨层; 应急监控

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)10-3914-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.10.083

Cross-layer communication design in wireless sensor networks for emergency monitoring applications

ZENG Yuan-yuan^{1a}, XIANG Kai^{1b,2†}

(1. a. School of Electronic Information, b. School of Computer, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. School of Information Management, Hubei University of Economics, Wuhan 430205, China)

Abstract: Wireless sensor networks in emergency monitoring applications have two challenges to face: the dynamic and time-varied network topology, and the serious collisions among emergency event areas. According to the above problems, this paper proposed cross-layer communication design by joint power control, MAC and routing together. It presented a centralized and distributed solution respectively. The solutions achieve real-time, robust and low-interference data transmissions. The NS2 simulation results show that the solutions have good performance of delivery ratio, timeliness and energy efficiency, as the emergency events spread and expand as well as the increased data source. The proposed scheme is more suitable for emergency applications with effectiveness compared with related work.

Key words: wireless sensor network; communication design; cross-layer; emergency monitoring

0 引言

传感器节点具有感知数据、采集处理数据和传输数据的能力。这些放置在监控区域内的传感器节点之间通过无线自组织的方式组网,并将监控数据通过多跳的方式传输到控制节点,由控制节点根据当前接收的环境数据来判断是否需要采取相应的措施。正由于无线传感器网络的自组织、无须人工监管等特点,已经被广泛应用到各种类型的环境监控应用中^[1]。

应急监控应用致力于保障监控区域内人身财产安全资源保护的及时性和有效性,考虑到监控事件的动态性和时变性等因素,因而对于环境数据采集的准确性和实时性要求也更高。应急监控应用作为一类特殊用途的无线传感器网络,受到应用自身特点和要求的限制,针对这类应用的无线传感器网络在通信协议的设计上有一些特殊要求和挑战,如果采用通用的传感器网络路由机制,在应急监控应用场景下网络性能将变得很差,因此必须有针对性地设计应用相关的路由机制。对于应急监

控的无线传感器网络来说,实时性和健壮性是十分关键的问题:在应急监控中,不符合时间限制的端到端投递将失去数据采集的意义;应急监控场景下,网络拓扑变化较快,保证通信机制健壮性十分重要。

对于一般的传感器网络应用而言,能量效率和最大化网络生命周期是通信设计的首要目标。它根据节点的可用能量或传输路径上的能量需求,选择数据的转发路径。还有一些研究针对一些对最大端到端数据投递时间有要求的传感器应用,提出了实时的传感器网络路由。SPEED^[2]协议是一种非常有效的可靠式路由协议,在一定程度上实现了端到端的传输速率保证。MMSPEED^[3]是一个在 SPEED 协议基础上提出的基于区分优先级服务的路由协议,可提供实时性和可靠性的 QoS 保证。MMSPEED 通过多条路径来实现数据分组的可靠传输,通过多个全局的分组传输速率来保证实现实时需求。

功率控制的方法在实时路由设计中是一种重要手段。RPAR^[4]是一个针对传感器网络设计的实时相关功率控制路

收稿日期: 2012-02-14; **修回日期:** 2012-03-22 **基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项资金青年教师资助项目(111093);国家自然科学基金青年科学基金资助项目(61103218);国家“973”计划资助项目(2011CB707100);湖北省自然科学基金资助项目(2011CDB446)

作者简介: 曾园园(1980-),女,湖北武汉人,讲师,博士,主要研究方向为无线传感器网络、无线自组网;项慨(1977-),男(通信作者),讲师,博士研究生,CCF 会员,主要研究方向为无线网络计算、多媒体通信技术(xksuckx@gmail.com)。

由协议。RPAR 假设每个节点知道自身位置,并且在布置后不再移动,这使得协议的应用具有较大的局限性。此外,增大传输功率会加重网络中通信的信号干扰和碰撞。一些文献针对特定类型的传感器网络监控应用提出了路由设计:Wenning 等人^[5]提出了适用于森林火灾应用场景中的一种反应式路由,能够自动发现节点的可能面临失效的威胁,并据此在路由失效发生改变之前作出路由策略调整;Tseng 等人^[6]提出了一种分布式的二维导航算法,用于在室内火灾中为逃生人员指示避开灾害区域通往出口的逃生路径;在此基础上,Pan 等人^[7]提出了更接近实际的三维紧急服务,用于在灾难发生时,指导被困人员到达安全位置,在三维环境中当室内已经无法找到通往出口的安全路径时,传感器将指示人员到达顶层天台以等待消防人员救助。Barnes 等人^[8]提出了一种分布式的算法用于指导逃生者在灾难发生时任一复杂的室内建筑结构下找到最安全的逃生路径,同时考虑了人员逃生的时间和火灾蔓延的时间,以保证给出的逃生路径是安全且是最短的。针对特定应用下传感器网络节点易于失效,从而导致网络拓扑出现隔离区域的情况,文献[9]提出了一种基于启发回避的地理路由协议以解决路由空洞问题。

一些文献也提出了利用跨层设计的思想优化网络性能:文献[10]提出了一种无线传感器网络跨层的泛洪路由策略,通过利用接收信号功率决定后退时间,从而减少广播冗余包和冲突;文献[11]提出了一种多天线多信道无线传感器网络中融合信道分配、功率控制、调度,实现低能耗、低传输延时的路由优化设计方法。

1 模型和定义

融合物理层、MAC 层和路由层的跨层设计中要解决的关键问题包括:a)功率消耗、能量和实时的折中问题。显然,增大节点发送功率,可以提高数据的实时投递,但会增加节点功耗,使其能量减少;b)干扰控制和实时的折中问题。增大节点发送功率在增加实时投递率的同时,也会增加网间信号的碰撞和干扰,从而导致网络性能降低。因此,这里将综合考虑功率控制、链路调度和实时路由的问题,在进行转发节点选择的时候,选择适当的发送功率,进行实时的 TDMA 链路调度,以保证较高概率的实时数据投递。

式(1)是由信噪比定义干扰的物理模型。从节点 u 发送的传输满足式(1)时,可以在时槽 t 被节点 v 成功接收。

$$\frac{G_{uv}P_{uv}}{N_0 + \sum_{(x,y \in \tau \setminus \{(u,v)\})} G_{xy}P_{xy}} \geq \beta \quad (1)$$

其中: τ 为在时槽 t 时刻的同时传输对; p_{uv} 为链路 (u,v) 上节点 u 的发送功率; G_{uv} 为链路 (ump) 上的信道增益,取决于路径丢失、信道衰减和遮蔽; β 为由 Quos 要求所决定的阈值如比特差错率; N_0 为热噪声功率。

干扰的协议模式定义可以用于评估干扰在节点间的通信影响。为保证节点从邻居有效地接收数据,必须保证当前传输与其他传输至少为 D 的安全距离(可不受干扰影响)。本文中为了简化问题,用干扰范围来定义干扰模型,并定义干扰半径等于传输半径,即干扰范围为节点的 2 跳范围。

本文提出的跨层通信融合了功率控制、链路调度和实时路

由(cross-layer communications, CC)问题。对于有向网络图 $G(V,E)$, CC 问题拟找出从源 s 到目的端 d 的路径且满足如下条件:

- a) 存在着最小的从 s 到 d 的链路功率分配: $\{p_0, p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 其中 $p_i \in [p_{\min}, \dots, p_{\max}]$, $i \in [0, 1, \dots, n]$ 。
- b) 根据功率分配,路径上的每条链路保证可行的调度。
- c) 从 s 到 d 的路径上延时小于等于 $T_{\max}$ 。

对于图 G 的一个有向链路 (u,v) , 当该链路上的发送端使用功率 p 在时槽为 slot 的传输无干扰时,其上调度 $(u,v;p, \text{slot})$ 是可行的。

2 CC 问题集中式算法

2.1 用线性规划描述问题

本文用线性规划(linear programming)来描述 CC 问题的集中式解法。给定网络图 $G(V,E)$, 对于从源 s 到 d 路径上的 k 个有向链路,每条链路上分配的功率为 p_k , 定义一个指示变量 $a_{e,t}$: 当链路 $e(i,j)$ 在时槽 t 被调度时, $a_{e,t} = 1$, 否则 $a_{e,t} = 0$ 。

$$a_{e,t} = \begin{cases} 1 & \text{if } e(i,j) \text{ is active at slot } t \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

从而可以定义集中式的 CC 问题如下,将其标记为 LP1:

$$\min \sum_{k=1}^K p_k \quad (3)$$

$$\text{s. t. } G_{u(e)v(e)} p_e - \beta \sum_{e' \in E \setminus |e|} a_{e',t} \times G_{u(e')v(e')} p_{e'} - \beta N_0 \geq 0 \quad (4)$$

$$\sum_{t=1}^k t_{u(e)v(e)} \leq T_{\max} \quad (5)$$

$$p_{\min} \leq p_k \leq p_{\max} \quad (6)$$

$$e(u,v;p_k) = e(u, \text{next_hop}(u, p_k)) \quad (7)$$

$$\sum_{e \in E} f_{u(e)v(e)}^m - \sum_{e \in E} f_{v(e)u(e)}^m = 0 \quad (8)$$

$$\forall u(e) \in V - \{s_m, d_m\} \quad m = 1, \dots, M \quad (9)$$

$$\sum_{e \in E, u(e)} f_{s_m v(e)}^m - \sum_{e \in E, v(e)} f_{u(e), s_m}^m = R_m \quad (9)$$

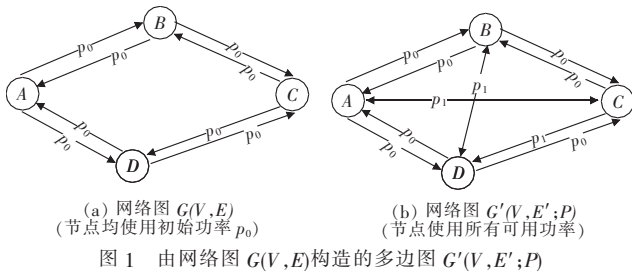
$$0 \leq f_{u(e)v(e)}^m \leq c_{u(e)v(e)} \quad (10)$$

$$f_{u(e)v(e)}^m = c_{u(e)v(e)} \times \sum \lambda \times a_{u(e)v(e)}^m \quad (11)$$

在上述用表达的问题规划中,式(3)为目标:找到路径的最小功率分配。其他为约束条件:式(4)是由信噪比定义的干扰的限制条件;式(5)是路由实时性的约束,即从 s 到 d 的总延时要小于给定的最大延时要求;式(6)是分配功率的合理取值范围;式(7)是边 e 的限定即由当前节点采用功率 p_k 得到的可达边;式(8)是路径链路上的流量约束条件,即除去路径的源端和目的端,中间链路上进入的流量等于流出的流量,式中考虑了多用户的在线路由的情况, m 为当前的连接数;式(9)为路径上的通信流量要求,满足给定流量 R_m ;式(10)为链路流量的合理范围,其最大值应小于等于链路能力;式(11)为当前链路上被激活部分的总流量, λ 为链路被激活调度的时间。为简化问题,可假定网络系统中的数据流为 CBR(固定码率)流,则 λ 为常数。

CC 问题即要找出最小功率实时路径上各链路的可行调度,其调度可以用三元组表示为:(有向边,功率,时槽)。在单一信道的无线网络中进行可行的无干扰调度问题是一个 NP 难问题。本文提出的问题更为复杂,不仅要进行无干扰的调

度,还要求最小功率分配和实时路由,因此 CC 问题显然也是 NP 难问题。直觉上,所有可能的并行的传输对形成的(有向边、功率和时槽)元组数目将随着有向边、功率和时槽的数目增加而呈指数增长。因此,本文试图找到一个次优解,即找到最优解传输对元组的一个次优子集。在连通的网络图 $G(V, E)$ 中,每个节点 u 可以用 K 档功率发送数据 $p_u \in [p_{\min}, \dots, p_{\max}]$ 。当图 G 中的节点逐级增大其功率直到最大功率 $p_{\max}$,可以到达不同的邻节点,构成不同的边,由此构造一个由图 G 构造的多边图 $G'(V, E'; P)$,其中 E' 为新的边集,表示节点采用不同档发送功率所能到达的邻节点, P 为节点使用的发送功率集合,如图 1 所示。



2.2 集中式算法设计

该算法可分为以下两步:a)搜索图 G' ,找出满足延时限制和干扰限制的传输对元组子集;b)在步骤 a) 搜索得到的子集中找到最小功率分配的传输对元组子集。

据此设计算法如算法 1 所示。

算法 1 CC 集中式解决方法

```

 $Z := \Phi; k := 1; p = p_0; T_e := \Phi; \text{path\_n} := 0; a_{e,t} := 0; ap_{e,t} := 0$ 
for  $i, j = 1, \dots, m$  // 多用户
while ( $k \leq k_{\max}$ ) // 最大查找次数
    DFSGraph( $G'$ )
    for all  $t \in \{t_0, t_1, \dots, t_L\}$ 
        assign a minimal available slot  $t$  to  $e$ 
        set  $ap_{e,t} = 1$ , add( $e, p, t$ ) to  $T_e$  with:
    s. t.  $G_{u(e')v(e')}P_e - \beta \sum_{e' \in E \setminus \{e\}} a_{e',t} \times G_{u(e')v(e')}P_{e'} - \beta \sum_{e' \in \text{path\_n} \setminus \{e\}} ap_{e',t} \times$ 
 $G_{u(e')v(e')}P_{e'} - \beta N_0 \geq 0$ 
 $T_{\text{slack}} - T_{\text{sche}} > 0$  // 实时性限制
    if (DFS search not return to  $s_i$ )
 $Z_{\text{path\_n}} := Z_{\text{path\_n}} \cup \{T_e\}$ 
    else
 $\text{path\_n} ++; Z_{\text{path\_n}} := Z_{\text{path\_n}} \cup \{T_e\}$ 
    end if
//  $Z_n$  记录从  $s_i$  到任一节点的第  $n$  个路径
end for all
if reaches  $d_j$ 
// 从  $s_i$  到  $d_j$  被存放在变量  $Z_{i,j,\text{path}}$  中
record  $Z_{i,j,\text{path\_n}}$ 
end for all
end if
 $k := k + 1$ 
end while // 对链路的最大查找次数
output  $Z_{i,j,n}$  with the minimal power; reset  $ap_{e,t}$ ;
set  $a_{e,t} = 1$  for  $e$  on path  $n$  // sub-optimized route
end for // 从  $s_i$  到  $d_j$  的多用户

```

算法查找基于图 G' 且采用链路准入控制策略用于决定一个多用户从 s_i 到 $d_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 的可行的链路调度。给定一个最大查找次数 $k_{\max}$, 帧长度为 L 且静态不变。查找的路径

次数被记录在 path_n 中,且传输对元组集合被记录到 Z 中。 $ap_{e,t}$ 被用于指示在 t 时槽时,可能的激活链路 e ,用于评估搜索的图 G' 中可能的干扰情况。而实际被激活的最小功率路径则由 $a_{e,t}$ 指示。当执行链路调度时,为链路 e 分配最小延时的可调度时槽;对于链路 $e(u, v)$,其上行链路为 $e'(w, u)$,它们共同的定点 u 分配了一个时槽 t' ,于是为 e 分配的时槽 t 必须要最小化 t 和 t' 的时间间隔,即 $\min(t + L - t')$ 。链路调度时间 $T_{\text{sche}} = T_e + T_s$,其中 T_e 为等待下一次链路调度的时间, T_s 为当前链路上调度的时间,取决于激活的时槽数目,由流量要求决定。

上述算法中,如果采用图的邻接表的数据结构,则算法的复杂度为 $O(|V| \times L + k_{\max} \times L)$ 。算法中,从源 s_i 到 d_j 路径上有 K 个有向链路(分别由 K 档发送功率构成),实现动态路由选取的方法为:根据功率由当前功率逐级增大的原则,依次尝试寻找符合端到端投递延时要求的可行调度,若这样的调度存在,则由选取功率、调度时槽和由选取功率可达边的下一跳节点构成跨层路由的三元组要素。

3 CC 问题分布式算法

3.1 帧结构定义

提出一种分布式 CC 问题解决方法。采用 TDMA 机制,传输时间可分为若干个帧,每个帧又由若干个不重叠的时槽组成,每个帧包含有 L 个时槽。每个时槽的长度足够用于一次数据传输和收到相应 ACK 确认响应。干扰范围(IA)为两个并行传输可能产生相互干扰的最大范围。由于频谱的不规则(节点的传输范围可以是不相同的),节点 B 可以收到节点 A 发来的数据,并不意味着节点 A 就可以收到节点 B 发送的数据,因此很难仅由节点跳数定义干扰范围。本文提出一个潜在干扰范围(PIA)的概念来简化问题。定义 PIA 为节点 2 跳邻居范围,并用 PIA 来预计 IA 的大致范围。帧结构定义如图 2 所示。

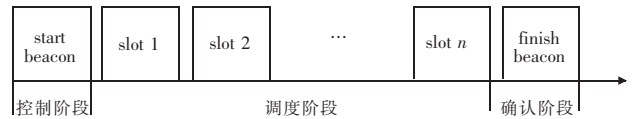


图 2 帧结构

每个帧由控制阶段、调度阶段和确认阶段组成:

a) 控制阶段。此阶段开始节点广播一个 start beacon 用于时间同步。在此阶段,节点通过邻居间信息交换,每个节点获取了 PIA 范围内的节点以及时槽分配信息。此过程中的信息交换采用了基于竞争(CSMA/CA)的机制或通过事先定义的优先次序接入媒体。然后,节点根据收集到的 PIA 内的节点信息,为当前调度分配时槽。链路时槽分配是基于准入控制的:调度最小延时的且无干扰的时槽;根据链路通信量要求决定链路分配时槽数目。为了简化问题,本文假定网络中是 CBR 流,且只需为每个链路分配一个单位的时槽。

b) 调度阶段。为当前链路调度分配的时槽,分配的时槽是低干扰的(在 PIA 范围内无干扰)且最小延时的时槽。由路由层通过给定延时 $T_{\max}$ 的限制决定路径上链路的实时性。

c) 确认阶段。此阶段节点将广播一个 finish beacon,用于确认实际分配的有效时槽。如果在多个连续帧中,拟分配的时

槽内,链路上没有调度的流量,则可以回收该时槽。如果分配的时槽上调度当前链路却有干扰产生时,该时槽将被重新标记为干扰时槽,当前链路将在下一个帧的控制阶段选择另一个可用的时槽。造成这种情形的原因是:使用 PIA 来估计干扰可能产生的范围不是完全准确的,在真实的传输情况下和发生干扰时,需要通过确认阶段提供的这种机制来发现和标记干扰时槽。

假定每个节点帧结构相同且帧长度不变。关于帧长度 L 参数的选择,需要保证本地干扰范围内的无干扰的传输。因此给定 L 的初始值为 $\lceil \Delta \rceil^2 + 1$, Δ 为网络图中节点最大度数。

每个节点本地维护的信息包括:

a) 节点的时槽分配信息表(SAI)。

b) 邻居节点以及 2 跳邻居(即 PIA 范围内的邻居)的时槽分配信息表。这可以通过帧的控制阶段节点的包含 SAI 的消息交换得到。

3.2 基于准入控制的分布式跨层通信

在跨层设计中,链路调度用于沿实时路由方向投递数据流。当增大功率,将得到更高的实时数据投递概率;而干扰范围随着功率控制导致的频谱变化而变化,因此增大功率同时也增大了干扰,从而导致网络性能下降。当减小功率,可以一定程度上缓解干扰问题,但同时也降低了数据的实时路由概率。采用准入控制机制,为节点选择合适的发送功率,以及低干扰的时槽分配策略,保证路径的链路上的低干扰调度同时提高实时数据投递率。链路准入控制机制在帧的各个阶段解释如下:

a) 在控制阶段。收集节点 PIA 范围内的节点时槽分配信息 SAI,据此获取当前可分配时槽信息(因为干扰的并行传输是不能同时调度时槽的)。对于路径上的路由选择和调度问题,使用准入控制机制,为当前节点和转发节点形成的链路选择一个满足延时要求的最小可调度时槽。链路准入控制的执行根据延时的要求和干扰限制条件决定:

(a) 计算可用时槽。可用时槽为 PIA 范围内没有被其他链路所使用的当前时槽。

(b) 计算在给定最大延时限制下的端到端投递的剩余延时 T_{slack} ,对于当前链路调度时间 T_{sche} ,要满足 $T_{\text{slack}} - T_{\text{sche}} > 0$ 。其中 $T_{\text{sche}} = T_c + T_s$, T_c 为从上一次调度完毕到等待当前链路调度所需时间, T_s 为当前链路上的调度时间,链路上调度的时槽数要满足链路上流量的要求。

时槽的分配和使用采用静态/动态相混合的方法。首先,每个要调度的链路根据准入控制分配了一个可用时槽。这之后都将用该时槽进行从 s_i 到 d_i 的路由。如果这个调度时槽在连续几个帧都没有被使用,则可将该调度时槽回收,标记为一个空闲的时槽,并能用于其他传输的调度。也就是说,每个链路将固定采用一个可调度时槽用于路由传输,直到该时槽在连续多个帧,不再被链路调度所使用,则将该时槽回收。

b) 在调度阶段。在满足准入控制的条件下,使用分配的时槽用于当前链路的传输。也就是说当前链路上有可用、实时且无干扰的时槽和满足流量要求的时槽数用于调度。

c) 在确认阶段。向 2 跳范围(PIA)内的邻居确认实际调度的时槽信息。在此过程中还需要根据链路的实际调度情况,处理时槽回收和解决干扰两个问题:

(a) 时槽回收。如果被分配的时槽,在连续几个帧都没有被调度用于传输,则将该时槽回收,并标记为可用时槽。

(b) 干扰的解决。由于频谱的不规则,PIA 只能对干扰的情况作大致的估计,根据准入控制分配的时槽在实际传输中还是有可能产生干扰,因此在确认阶段对于实际传输发生了干扰的时槽,将其标记为干扰时槽,并在下一个帧的控制阶段,当前调度将重新选择一个新的可调度时槽用于传输。

算法 2 描述了跨层路由问题的分布式解决方法。算法 2 为线性时间复杂度,因此适合于面向灾难应急的应用场景。

算法 2 分布式 CC 问题解决方法

```

for node  $u$  select the next hop with  $p_0$ 
if  $p_0$  can reach  $v$ 
if link_admission_control( $u, v; p_0$ ) is successful
    assign slot for  $e$ 
else
do
increase  $p_{\text{cur}}$  to  $p_{\text{cur}} + 1$ 
 $p_{\text{cur}} \leftarrow p_{\text{cur}} + 1$ 
link_admission_control( $u, v; p_{\text{cur}}$ )
until  $p_{\text{max}}$  or admission control successful
enddo
if  $p_{\text{max}}$ 
    real-time routing is blocked
end if
end if
end if
end for
proc link_admission_control( $u, v; p_i$ )
{
    slot( $e$ )  $\leftarrow$  subset of ( $L \backslash \text{slot}(e')$ ) with size flow $_e$ ;
    //  $e'$  是链路  $e$  的干扰链路
    s. t.  $T_{\text{slack}} - T_{\text{sche}} > 0$ 
}

```

4 模拟结果和分析

采用 NS2 模拟工具搭建实验环境,获得数据。为了搭建接近真实情况的模拟环境,参考了 MICAz 系列传感器节点的各项参数用于实验,参数如表 1 所示。

表 1 模拟参数

参数	值
传播模式	shadowing
隐蔽偏差	4.0
参考距离	1.0
物理层	Phy/WirelessPhy/802_15_4
MAC 层	Mac/802_15_4
载波阈值(CSThresh _l)	5.297 54e-11
接收阈值(RXThresh _l)	5.297 54e-11
发送功率(pt _l)	5.353 95e-05/0.000 214 158/0.000 481 855
频率(freq _l)	2.4e+9
通信流	CBR
包大小(packetSize _l)	70
通信流间隔(interval _l)	0.0969
节点初始能量	3.6J

所有节点工作在 3 档可调节功率情况下,初始采用最小档功率作为默认发送功率。采用 100 个节点均匀放置在 100 m × 100 m 的区域。随机选择 4 个源节点和 20 个源节点向 sink 节点报道事件数据,实验中使用 1 个 sink 节点,模拟时间是 300 s。模拟场景中,一个随机选择的灾难源在 30 s 产生,网络中所有节点不能移动,灾难事件以恒定的每隔 10 s 向其邻居

节点扩散蔓延,处于灾难事件中节点经过 10 s 时间将无法工作处于失效状态。此外当节点的剩余能量低于 1% 时,也无法正常工作。

比较 RPAR 功率控制的实时路由在 4 个源节点和 20 个源节点情况下的网络性能(这些源节点在网络中周期性产生 CBR 数据流)。然后对比本文提出的跨层集中式(CCC)算法和分布式(DCC)算法。此外,比较了灾难中 20 个随机选取的源节点报道数据情况下算法的性能。比较的网络性能包括:路由数据投递延时,包的非实时丢失率和节点平均能量,通过这些性能标准实验数据的比较,观察跨层设计的算法在能量、实时投递和干扰方面的折中。

图 3 显示了当最大延时要求从 30 ms 依次按 5 s 递增放宽到 100 s 的情况下,当网络中有 4 个随机数据源和 20 个随机数据源报道数据时,路由得到的包的非实时丢失率。由图中结果可以看出,当灾难蔓延和扩散、多个节点报道事件数据时,RPAR 的性能由于干扰和实时路由的影响,包丢失率非常高。

图 4 显示了当网络中有 20 个随机数据源报道数据时,最大延时要求从 30 ms 依次按 5 s 递增放宽到 100 s 的情况下,RPAR、DCC 和 CCC 的端到端路由投递延时的结果。RPAR 由于干扰的原因,端到端投递延时最大,相比而言 DCC 和 CCC 具有良好的实验结果,因为在这两种算法中引入了跨层机制,在选择实时路由的同时,为链路选定一个低干扰的时槽用于传输,从而减少了信号碰撞和干扰。从实验结果可以看出,DCC 的算法实验数据与 CCC 集中式十分接近,因此 DCC 的分布式解性能良好。

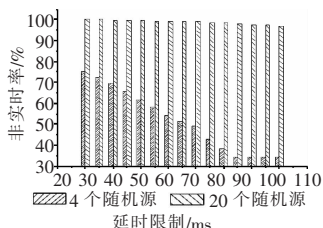


图 3 RPAR 包非实时丢失率

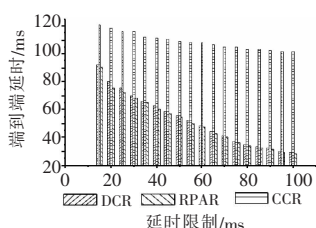


图 4 RPAR、DCC 和 CCC 端到端延时

图 5 显示了当网络中有 20 个随机数据源报道数据时,最大延时要求从 30 ms 依次按 5 s 递增放宽到 100 s 的情况下,RPAR、DCC 和 CCC 的包非实时丢失率的结果。由于功率增大干扰增加的影响,RPAR 的包丢失率很高。而 DCC 和 CCC 引入的链路调度有效减少了网间并行传输的干扰,结构表明其具有良好的性能。图 6 显示了随着模拟时间从 100 s 到 300 s 时间内,使用 RPAR 和 DCC、CCC 三种机制情况下,网络节点平均剩余能量对比。

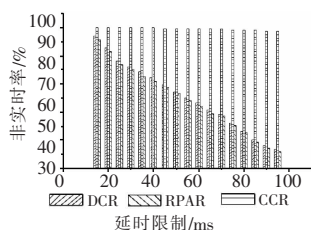


图 5 RPAR、DCC 和 CCC 包非实时丢失率

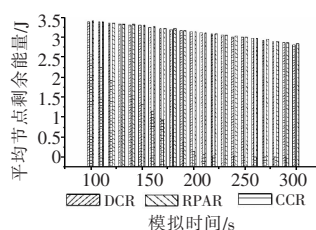


图 6 RPAR、DCC 和 CCC 节点剩余能量

由图 6 可知,RPAR 的能量性能最差,因此 RPAR 中当报道的源节点数较多以及功率增大的因素,导致网络中存在着较大干扰,影响了数据的有效传输,造成信号干扰和碰撞,需要重

传,从而造成了能量的浪费。而 DCC 和 CCC 算法中对功率调节和实时路由、低干扰调度三者融合考虑并进行折中,从而网络间节点并行传输的干扰性降低,同时功率控制中为节点选择的最小可调度发送功率,在保证实时、低干扰传输的同时,也考虑了能量性能,避免能量的浪费。

5 结束语

面向应急监控的无线传感器网络能够协作地实时监测、感知和采集分布区域内的各种环境或监测对象的信息,并对其进行处理。在该过程中,数据的实时路由对应用的成功起着至关重要的作用。在应急监控应用场景中,考虑到网络拓扑的动态性和时变性,以及事件分布区域的网间并行传输干扰等的影响,网络性能下降。针对这种情况,本文提出一种跨层设计方法,融合了功率控制、链路调度和实时路由。并提出一种基于线性规划的集中式解决方法和一种启发式的分布式算法。NS2 模拟结果表明,与相关研究对比,文中提出的算法在应急灾难模型下随着数据源增加时具有良好的数据投递率、实时性和能量效率。

参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. A survey on sensor networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8): 102-114.
- [2] HE T, STANKOVIC J, LU C, et al. SPEED: a stateless protocol for real-time communication in sensor networks [C]//Proc of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems. 2003.
- [3] FELEMBAN E, LEE C G, EKICI E, et al. Probabilistic QoS Guarantee in reliability and timeliness domains in wireless sensor networks [C]//Proc of the 24th INFOCOM. 2005.
- [4] CHIPARA O, HE Z, XING G, et al. Real-time power-aware routing in sensor networks [C]//Proc of the 14th IEEE International Workshop on Quality of Service. 2006.
- [5] WENNING B L, PESCH D, TIMM-GIEL A, et al. Environmental monitoring aware routing: making environmental sensor networks more robust [J]. *Telecommunication Systems*, 2009, 43(1): 3-11.
- [6] TSENG Y C, PAN M S, TSAI Y Y. Wireless sensor networks for emergency navigation [J]. *IEEE Computer*, 2006, 39(7): 55-62.
- [7] PAN M S, TSAI C H, TSENG Y C. Emergency guiding and monitoring applications in indoor 3D environments by wireless sensor networks [J]. *International Journal of Sensor Networks*, 2006, 1(2): 2-10.
- [8] BARNES M, LEATHER H, ARVIND D K. Emergency evacuation using wireless sensor networks [C]//Proc of the 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks. 2007.
- [9] 王国军, 王田, 贾维嘉. 无线传感器网络中一种基于行进启发的地理位置路由 [J]. *传感技术学报*, 2007, 20(2): 382-386.
- [10] TANG Z, HU Q. A cross-layer flooding strategy for wireless sensor networks [C]//Proc of the 5th International Conference on Industrial and Information Systems. 2010.
- [11] LI Jin-bo, GUO Xiao-hang, GUO Long-jiang. Joint routing, scheduling and channel assignment in multi-power multi-radio wireless sensor networks [C]//Proc of the 30th IEEE International Conference on Performance Computing and Communications. 2011: 1-8.