

带冲突避免和流量自适应的 低功耗侦听 MAC 协议

彭昌睿, 黄宏光

(四川大学 电气信息学院, 成都 610065)

摘要: 为提升无线传感器网络在能耗、时延以及动态适应负载方面的综合性能,对几种典型 MAC 协议进行了分析,提出了一种带冲突避免和流量自适应的 LCT-MAC 协议。在该协议中,长前导码被划分为多个小前导码,并嵌入目的节点地址信息,避免了串音;节点可以根据网络流量调整睡眠周期,减少了时延;在重负载时,节点能基于优先级信息选择退避时长,避免冲突。仿真结果表明,与 S-MAC 协议和 LPL 协议相比,LCT-MAC 协议降低了传输时延,并减少了全网能耗和数据包碰撞次数,具有优良的综合性能。

关键词: 无线传感器网络; 冲突避免; 流量自适应; 时延; 能耗; 优先级

中图分类号: TP393.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)09-2835-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.09.070

Low power listening MAC protocol with collision avoidance and traffic adaption

PENG Chang-rui, HUANG Hong-guang

(School of Electrical Engineering & Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To improve performance of wireless sensor networks in terms of energy consumption, network latency and traffic adaption, this paper proposed LCT-MAC with collision avoidance and traffic adaption through analyzing some classic MAC protocols. This protocol divided the long preamble into lots of small ones embedded with destination address to avoid crosstalk, and adjusted nodes sleep cycle according to traffic loads dynamically, and chose proper backoff time to avoid message collisions on the basis of nodes' priority. Simulations demonstrate that LCT-MAC is superior to both S-MAC and LPL in aspects of network latency, energy consumption as well as message collision, and has a good performance.

Key words: WSN; collision avoidance; traffic adaption; latency; energy consumption; priority

0 引言

无线传感器网络(WSN)是大量以电池供电的传感器通过自组织和多跳的方式而构成的无线网络,其目的是协作地感知、采集、处理和传输网络覆盖地理区域内感知对象的监测信息,并报告给用户。由于具有自组织、易扩展和实时性等优点^[1],无线传感器网络被广泛应用到军事侦查、环境监测和智能交通等各个领域^[2]。在 WSN 中,媒体访问控制 MAC 决定了 WSN 中的能耗、吞吐量、延迟等多个性能指标^[3]。在 MAC 协议设计中,能量有效性是一个贯穿始终的重要指标^[4]。无线传感器网络能量浪费主要集中在空闲侦听、消息碰撞、邻居节点串听和控制报文开销四个方面,其中空闲侦听是造成能量损耗的最主要原因^[3,5]。

1 相关工作

WSN 中的 MAC 协议大致分为同步协议、异步协议和混合协议。同步协议指邻节点间协调侦听与传输时间,同时醒来和睡眠,减少空闲侦听;异步协议指发送端在发送数据前发送前

导码来通知接收端做好接收准备,以减少同步的开销。

在同步协议 S-MAC 中,节点通过周期性广播 SYNC 消息和保存邻节点的时间信息来形成虚拟簇,达到同步,并且利用周期性的侦听和睡眠机制,大幅节省了能耗。为避免碰撞,S-MAC 采用了虚拟载波侦听和物理载波侦听相结合的机制^[3]。节点在侦听到信道空闲时才发送数据,并且每个节点都维护一个 nav 变量,用于记录当前正在传输的数据剩余传输时间,在 nav 不为 0 时,都表示信道忙碌。在 S-MAC 中,由于 RTS/CTS/ACK 应答机制的应用,使其在很大程度上避免了串音。T-MAC^[6]协议针对 S-MAC 不能动态适应负载变化的缺陷作了改进。在保持周期长度不变的基础上,T-MAC 根据通信流量动态地调整活动时间,用突发方式发送信息,减少空闲侦听时间。

基于异步机制的 LPL^[4,7]协议通过发送前导码的方法来唤醒接收节点,但由于其前导码长度固定,且不带目的节点地址,使得目的节点周围的邻居节点都有可能接收到源节点的前导载波并且接收数据,造成串音。针对 LPL 的这一问题,Wise-MAC^[3,8]协议提出在目的节点快要进行载波侦听时才开始发送前导载波的方法,用以缩减前导载波长度。但该方法需要精确地掌握节点时间信息,执行难度较大。B-MAC^[3,5]协议采用

收稿日期: 2012-12-26; 修回日期: 2013-02-15

作者简介: 彭昌睿(1988-),男,四川绵阳人,硕士研究生,主要研究方向为信号与信息处理、无线数据通信、系统检测与网络管理(coolrui.toto@163.com);黄宏光(1961-),男,副教授,硕导,主要研究方向为无线数据通信、系统检测与网络管理。

了空闲信道评估技术(CCA)和低功率侦听(LPL)技术,大幅减少了空闲侦听的时间,但仍然存在串听。B-MAC 为应用提供了一个可根据数据流量而动态调整睡眠周期的界面,具体调整的方法可由应用的开发者制定。典型协议及其特点如表1所示。

表1 典型协议对比表

协议	优点	机制	缺陷
S-MAC	减少空闲侦听	虚拟簇/周期性	逐跳延时
T-MAC	自适应调整占空比	TA 机制	早睡
LPL	减少空闲侦听	发送前导码	串听
B-MAC	大幅减少空闲侦听	CCA/LPL	串听
Wise-MAC	缩短前导码长度	适时发前导码	延时大

为弥补其他协议的缺陷,本文提出了一种带冲突避免和流量自适应的低功耗侦听 MAC 协议(LCT-MAC)。该协议将长前导码划分为不连续的小前导码,并且携带节点地址信息;目的节点可根据流量动态调整侦听和睡眠周期;另外,在冲突避免方面,采用了优先级的概念来选择退避时间。

2 LCT-MAC 协议的设计方法

针对其他协议的不足,LCT-MAC 协议的设计目标是:能量有效性、降低延时、减少冲突以及数据流量自适应。

2.1 非连续的小前导码降低空闲侦听

在 LPL 中,目的节点侦听到前导码后会一直空闲侦听,直到前导码发送完毕,造成了能量的浪费。为了使目的节点在侦听到前导码后能立即告知源节点,LCT-MAC 采用不连续的小前导码,在两个小前导码之间,源节点侦听目的节点的 ACK。对于目的节点,当侦听到源节点的前导码时,若自己是目的地节点,则向源节点发送 ACK,告知源节点已做好接收准备。LCT-MAC 的时序如图1所示。

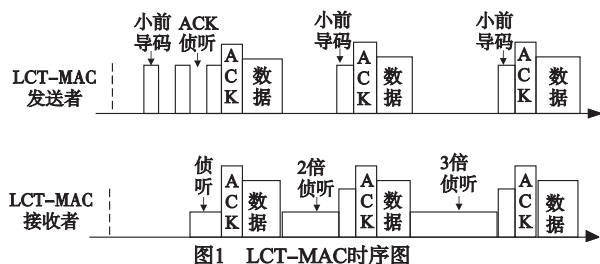


图1 LCT-MAC时序图

2.2 引入目的地节点地址信息

由于 LPL 和 B-MAC 中的前导码中不含目的节点地址信息,且长度较长,极有可能多个节点都侦听到该前导码的存在,并开始接收数据,造成串音干扰,导致能量浪费。而在 LCT-MAC 中,每个小前导码都含有目的地节点地址信息,非目的地节点会在侦听到该前导码后睡眠,避免了串音的发生。

2.3 基于优先级的冲突避免

WSN 通常拥有较复杂的拓扑结构,当数据流量较大时,多个子节点可能同时向父节点发送数据,造成消息碰撞,导致能量损耗和延时。针对消息冲突问题,LCT-MAC 提出了一种基于节点优先级的冲突避免方式。优先级参数 N 代表每个节点缓冲区内数据包个数。这种方法的中心思想是源节点通过侦听到其他源节点的 N 来选择退避的时长,从而避免了冲突。该冲突避免机制实现流程如图2所示。

2.4 目的节点引入深度自适应机制

为适应无线传感器网络中动态变化的数据流量,使整个网

络高效运转,LCT-MAC 引入了深度自适应机制。

1) 动态增加侦听时长 若目的节点连续成功接收到多个数据包时,说明此时网络中流量较大,其在接收完数据后保持2倍于基本侦听时长的额外侦听。若在此期间内又接收到数据包,则再侦听3倍于基本侦听时长的时间。依此类推,直到在额外侦听时间内没有接收到数据包,目的节点进入睡眠,当下一个侦听周期来临时,仍然以基本侦听时长开始侦听。为了避免无限延长额外侦听时长而造成延时,LCT-MAC 把最大的额外侦听时长设为基本侦听时长的3倍。

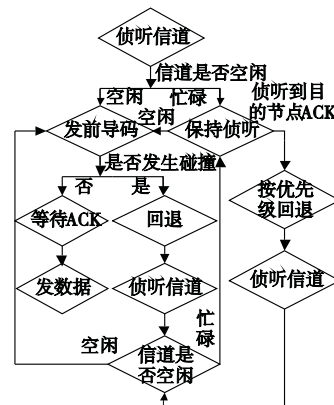


图2 优先级冲突避免机制流程

2) 动态调整节点睡眠时长 在目前的多数 MAC 协议中,侦听时长与睡眠时长比值固定,不适应网络中流量的变化。而 LCT-MAC 能根据网络流量的大小,动态调整目的节点的睡眠时长来降低能耗和减少延时。假设目的节点当前的睡眠时长为 T_g 。当节点检测到网络中数据流量减少时,便采用加性加的方式增加自身的睡眠时间,即 $T_{\text{new}} = T_g + X$, X 表示加性加参数,可根据实际需要设置;若检测到网络中数据流量增大时,目的节点将采取乘性减的方式缩短睡眠时长,新的睡眠时长 $T_{\text{new}} = T_g / k$, k 代表乘性减系数,可根据实际需要设定。

3 LCT-MAC 协议的性能分析

3.1 延时分析

在 LPL 中,每个数据包的延时等于一个前导码的长度。为了计算方便,假设前导码的长度等于目的地节点的侦听周期 T 。因此,在 LPL 中,每个数据包的平均延时为 T 。

假设发送前导码时长为 T_p ,发送 ACK 时长为 T_a ,发送数据时长为 T_d 。对于 LCT-MAC,目的节点平均基本侦听时长为

$$T_d = (3T_p + T_a) / 2 \quad (1)$$

由于源节点平均等待 $T/2$ 个时长才能等到目的地节点的侦听。因此,第一个数据包的延时为

$$T_{\text{delay1}} = \frac{T}{2} + \frac{3T_p + T_a}{2} + T_a \quad (2)$$

若源节点还有数据要发送,则先发送一个小前导码。由于此时目的地节点一直处于侦听状态,所以源节点能立即接收到 ACK。因此第二个数据的延时为

$$T_{\text{delay2}} = T_p + T_a \quad (3)$$

依此类推,第3个、第4个乃至第 m 个数据的延时都是 $T_p + T_a$ 。所以在 LCT-MAC 协议下每个数据包的平均延时为

$$T_{\text{delay}} = [T + (2m + 1)(T_p + T_a)] / 2m \quad (4)$$

与 LPL 下的延时 $T^{\text{LPL}} = T$ 相比,由于 T 远大于 T_p 和 T_a ,所以 LCT-MAC 协议下,每个数据包的平均延时几乎只有 LPL 协

议下延时的 $1/2m$ 。因此,通过采用流量自适应机制,LCT-MAC 在减少延时方面的性能得到了巨大的提升。

3.2 能耗分析

假设接收功率为 P_r ,传输功率为 P_t ,睡眠功率为 P_s ,侦听功率为 P_d ,对以下各部分进行能耗分析。

1)发送端 由于源节点需平均等待 $T/2$ 才能接收到 ACK 消息,故在该时长内,源节点的功耗为

$$E_1^T = \frac{T(P_t T_p + P_d T_a)}{2(T_p + T_a)} \quad (5)$$

所以第一个数据的平均能耗为

$$E_1^T = (P_t T_p + P_d T_a) \frac{T + 2(T_p + T_a)}{2(T_p + T_a)} + P_t T_d \quad (6)$$

当发第二个数据时,源节点先发前导码,然后侦听 ACK,并开始发送数据。第二个数据的能耗为

$$E_2^S = P_t T_p + P_d T_a + P_t T_d \quad (7)$$

依此类推,第 $3 \sim m$ 个数据的能耗都与第二个一样。因此,每个数据包的平均能耗为

$$E_{\text{sender}}^{\text{LCT}} = P_t T_p + P_d T_a + P_t T_d + \frac{T(P_t T_p + P_d T_a)}{2m(T_p + T_a)} \quad (8)$$

2)接收端 目的节点第一个侦听时长为基本平均侦听时长。因此,接收第一个数据的能耗为

$$E_1^r = P_d(3T_p + T_a)/2 + P_t T_a + P_r T_d \quad (9)$$

接收完数据后,目的地节点开始额外侦听,时间以基本侦听时长的整数倍递增,且最大为 3 倍。

因此,第二个数据包能耗为

$$E_2^r = P_d(3T_p + T_a) + P_t T_a + P_r T_d \quad (10)$$

第三个及其以上数据包能耗均为

$$E_{3,\dots,m}^r = \frac{3}{2}P_d(3T_p + T_a) + P_t T_a + P_r T_d \quad (11)$$

所以,接收端数据包平均能耗可表示为

$$E_{\text{receiver}}^{\text{LCT}} = 3P_d(3T_p + T_a)/m + P_t T_a + P_r T_d \quad (12)$$

在 LPL 下,发送端单个数据包能耗为

$$E_{\text{sender}}^{\text{LPL}} = P_t(T + T_d) \quad (13)$$

在接收端,目的地节点保持侦听的时间为 $T/2$ 。因此,接收端单个数据包能耗为

$$E_{\text{receiver}}^{\text{LPL}} = P_d T/2 + P_t T_a + P_r T_d \quad (14)$$

$$\text{令: } S_{\text{receiver}} = E_{\text{receiver}}^{\text{LPL}} - E_{\text{receiver}}^{\text{LCT}} = P_d T/2 - 3P_d(3T_p + T_a)/m \quad (15)$$

由于 $T > T_p$ 和 T_a ,所以 $S_{\text{receiver}} > 0$,即 LCT-MAC 接收端单个数据包能耗小于 LPL。

在发送端,令

$$S_{\text{sender}} = E_{\text{sender}}^{\text{LCT}} - E_{\text{sender}}^{\text{LPL}} \quad (16)$$

$$S_{\text{sender}} = \frac{(P_t T_p + P_d T_a)T}{2m(T_p + T_a)} + \frac{2m(T_p + T_a)(P_t T_p + P_d T_a - P_t T)}{2m(T_p + T_a)} \quad (17)$$

令式(17)分子之和为 A 。通过查阅数据收发模块的参数手册可知,发送功率多数情况下为侦听功率的 4 倍以上,于是令 $T_a = wT_p$, $P_t = 4P_d$,得

$$A = T_p T P_d [(4 + w) - 8m(1 + w)] + 10P_d m(1 + w)T_p^2 \quad (18)$$

假设 $A < 0$,则

$$T/T_p > 5/4 + (5 + 1.25w)/[8m(1 + w) - (4 + w)] \quad (19)$$

由式(19)可知,右边部分是一个关于 m 的减函数, m 越

小,则右边部分的值越大。又因为 m 最小为 1,所以右边部分最大值为

$$10/7 + 30/(28 + 49w) \quad (20)$$

观察可知,式(20)是一个以 w 为变量的减函数, w 越小,函数值越大。此处, w 的最小值不能小于 0,所以式(20)的最大值为 2.5。对于 T/T_p 而言,显然其值是大于 2.5,因此假设条件 $A < 0$ 成立,所以有

$$E_{\text{sender}}^{\text{LCT}} - E_{\text{sender}}^{\text{LPL}} < 0 \quad (21)$$

所以,不论是在发送端还是接收端,LCT-MAC 协议下的单个数据包所需能耗均小于 LPL 协议。

3.3 算法复杂度分析

就时间复杂度而言,LCT-MAC 协议较 S-MAC 协议有明显的优势。在 S-MAC 中,邻节点间首先要相互发送和接收同步信息,并根据其他节点的时间信息来调整自己的时间表,从而建立一个同步的虚拟簇。然后,源节点和目的节点间必须通过 RTS/CTS/ACK 等一系列繁琐的握手过程才能建立通信。因此,S-MAC 下的整个数据收发过程不仅耗时长,且执行步骤多。而在 LCT-MAC 中,发送节点只需发送小前导码;接收节点在根据前导码中的地址信息确认自己为目的节点后,向源节点回送 ACK,从而建立起通信,整个过程简单明了。

就空间复杂度而言,在 LCT-MAC 协议中,节点只需要保存自己的优先级信息及目的节点地址信息。而在 S-MAC 中,每个节点除了要保存目的节点地址信息,还必须多次保存其邻节点的时间信息,直到虚拟簇内所有节点达到同步,而且边界节点需要保存多个虚拟簇的时间表。因此,采用 S-MAC 协议时,计算机需要占用更多的存储空间,执行更多的命令才能实现该协议。

4 仿真实验

为了能更直观地展示 LCT-MAC 协议的性能,本文采用了 OMNET ++ 4.0 软件对其进行了仿真操作,并且将结果与 LPL 和 S-MAC 进行比较。

为了评估 LCT-MAC 在能耗和时延方面的性能,本次仿真建立了一个 10 跳的线型拓扑网络,通过调节数据流量的大小来观察 LCT-MAC、LPL 和 S-MAC 三种协议下,节点在发送和接收单个数据包时的平均能耗和延时。数据流量变化设置为 1 ~ 500 bps,以 25 bps 为单位递增。

4.1 数据包能耗

三种协议下,单个数据包成功发送/接收所需要能量值如图 3 所示。

由图 3 可以看出:

a)三种协议下,单个数据包能耗都随着数据流量的增大而减少,这与实际情况吻合。因为随着流量的增大,单位时间内转发的数据包数量相对增加,导致发送/接收每个数据包的时间减少,因此每个数据包消耗的平均功率也跟着减少。

b)LCT-MAC 与 LPL 都属于异步通信协议,不需要控制字开销维持节点同步,且目的节点的侦听时长也小于同步协议。因此 LCT-MAC 和 LPL 下的单个数据包能耗要小于 S-MAC。

c)由于 LCT-MAC 采用了流量自适应、冲突避免以及引入目的地节点地址信息,该协议下单个数据包的能耗远小于 LPL。

4.2 数据包延时

WSN 中,延时也是评估网络性能的重要指标。本次仿真以单个数据包在 10 跳范围内的总延时作为评估 LCT-MAC、LPL 和 S-MAC 的参考标准,仿真结果如图 4 所示。

由图 4 可知:

a)随着网络流量不断增大,每种协议下数据包的延时都在增加。这是因为当流量增大时,路径中每个节点需要发送和接收的数据包数量增加,导致数据包不能及时转发,造成了延时。

b)S-MAC 协议是一种侦听/睡眠周期固定的同步协议,邻节点间进行的调度表交换造成了一定延时;另外,固定的占空比使在活动周期内没有传完的数据必须等到下一个活动周期到来后才能继续传输,这也造成了巨大的延时。因此 S-MAC 协议数据包的延时要高于 LCT-MAC 和 LPL 协议。

c)LCT-MAC 协议采用了流量自适应的机制,目的节点能够较及时地接收源节点的数据,使其在时延方面的性能远好于 LPL。

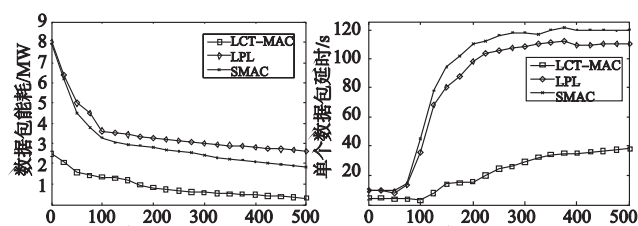


图3 单个数据包能耗仿真

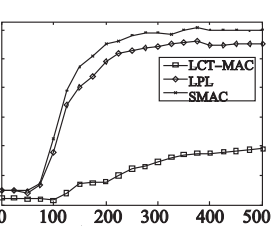


图4 单个数据包延时仿真

4.3 冲突碰撞

为了评估 LCT-MAC 协议在冲突避免方面的性能,本次仿真建立了一个最多拥有 10 个子节点的星型拓扑网络,在 25 bps 和 100 bps 两种数据率下观察三种协议下数据包发生冲突的次数。

1) 25 bps 下的冲突次数

由图 5 可看出,在低速率下,随着子节点个数的增加,LPL 协议和 S-MAC 协议数据包发生冲突的次数都在增加。由于 S-MAC 采用了物理和虚拟载波侦听机制,且应用了 RTS/CTS/ACK 应答机制,所以在很大程度上避免了冲突。而 LPL 协议没有采用任何冲突避免机制,所以当子节点个数增加时,LPL 中数据包发生碰撞的次数要明显大于 S-MAC。

由于 LCT-MAC 采用了基于优先级的冲突避免机制,能够根据节点优先级很好地选择退避时间,所以在低速率下未发生碰撞。

2) 100 bps 下的冲突次数

由图 6 可知,在 100 bps 数据率下,三种协议数据包碰撞次数随着子节点个数的增加而增加。这是由于在较高数据率下,可能会出现几个源节点同时向一个目的地节点发送数据的情

况,这就不可避免地导致了数据包的冲突。但 LCT-MAC 协议中数据包发生冲突的次数要明显少于 LPL 和 S-MAC 协议。

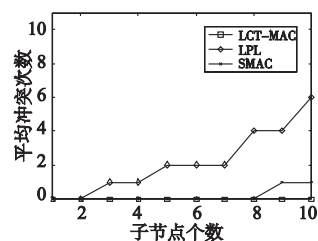


图5 25 bps 下冲突次数仿真

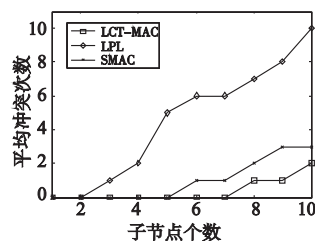


图6 100 bps 下冲突次数仿真

5 结束语

本文在研究异步低功耗侦听 MAC 协议的基础上,提出了带冲突避免和流量自适应的低功耗侦听 MAC 协议。该协议主要包括了发送带目的地节点地址信息的小前导码、网络流量自适应以及基于优先级的冲突避免三种机制。经过理论和仿真论证均表明,LCT-MAC 协议在降低能耗、减少延时以及避免冲突三大方面都具有优良的性能,并且具有较大的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 陈德富,陶正苏,朱建平.一种自适应侦听的异步无线传感器网络 MAC 协议[J].电子与信息学报,2011,33(6):1290-1293.
- [2] 田海涛,谭敏生,陈伟.一种低功耗的无线传感器网络 MAC 协议[J].网络安全技术与应用,2010(1):74-77.
- [3] 唐宏,谢静.无线传感器网络原理及应用[M].北京:人民邮电出版社,2010:76-92.
- [4] 胡四泉,王俊峰.无线传感器网络的智能低功耗侦听协议[J].通信学报,2009,30(9):95-101.
- [5] YE W, SILVA F, HEIDEMANN J. Ultra-low duty cycle MAC with scheduled channel polling[C]//Proc of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press,2006:321-333.
- [6] STONE K, COLAGROSSO M. Efficient duty cycling through prediction and sampling in wireless sensor networks[J]. Wireless Communications and Mobile Computing-Cognitive Radio, Software Defined Radio and Adaptive Wireless Systems, 2007, 7(9): 1087-1102.
- [7] BUETTNER M, YEE G, ANDERSON E. X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks[C]//Proc of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press,2006:307-320.
- [8] POLASTRE J, HILL J, CULLER D. Versatile low power media access for wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press,2004:95-107.

下期要目

◆ 群签名综述

◆ 基于 UDP 的高速网络传输协议研究

◆ 无线传感器网络访问控制的研究进展

◆ 流身份鉴别技术研究进展

◆ 存在多工序同时结束的综合调度算法

◆ 大规模定制环境下基于模块化的产品制造时间制定研究

◆ 基于粒计算的粗糙集聚类算法

◆ 汉语连续语音识别系统中三音子模型的优化

◆ 求解约束优化问题的中心引力优化算法及其工程应用

◆ 随机需求和奖惩机制下的闭环供应链决策模型

◆ 时间递推耦合神经网络的交通路径动态诱导技术

◆ 基于自适应的高对比性子空间的高维离群点检测