

移动传感器网络中基于概率分布的动态的低冗余路由算法

卢文伟 李光辉 冯海林

(浙江农林大学信息工程学院 临安 311300)

摘要 受到节点移动、有限的存储空间及能量等因素的影响,容延迟移动传感器网络在将数据汇聚至 Sink 过程中伴随着较高的丢包率与数据冗余,传统的确定性路由机制难以应用。对此,利用节点在一定数量时间槽内与 Sink 点连通的概率分布,提出了一种动态的、分布式的路由算法。该算法充分利用了节点的移动性,使网络在保持低冗余的同时,具有较高的数据送达率。实验结果表明,在节点数多、移动速度快、节点传输距离大的网络中,该算法更具优势。

关键词 传感器网络,容延迟,概率分布,路由

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Dynamic and Low Redundancy Routing Algorithm Based on Probability Distribution in Mobile Sensor Networks

LU Wen-wei LI Guang-hui FENG Hai-lin

(School of Information Engineering, Zhejiang Agricultural and Forestry University, Lin'an 311300, China)

Abstract Because of the node mobility, limited storage space, limited energy and other factors, delay tolerant mobile sensor network(DTMSN) is suffered from high packet loss rate and high data redundancy. Thus the traditional deterministic routing mechanism can't be directly applied to DTMSNs. A dynamic and distributed routing algorithm was proposed, which was based on the node's probability distribution of connecting with sink within given number of time slots. The algorithm makes full use of the node mobility so that the network can maintain low redundancy and achieve high data delivery rate at the same time. Experimental results show that the proposed algorithm has more advantages when the network has more nodes with faster speed and larger transmission range.

Keywords Sensor network, Delay tolerant, Probability distribution, Routing

1 引言

无线传感器网络(WSN, Wireless Sensor Network)是一门综合了嵌入式计算技术、传感器技术、无线通信技术、分布式数据处理等技术的交叉学科^[1]。由于 WSN 具有可快速部署、低成本、可自组织、组网灵活等特点,其在科学研究、环境监测、军事领域、医疗卫生、家庭生活、太空探索等领域具有广阔的应用前景。

不同于传统节点位置固定的传感器网络,在一些特定环境及应用的传感器网络中,如:野生动物监测传感网(Wildlife Tracking/Monitoring Sensor Networks)^[2]、车载传感网(Vehicular Sensor Networks)^[3]等,网络中的节点是移动的。在这类传感器网络中,由于受到节点移动、传感器节点有限的存储空间与电源等因素影响,因此网络的连通性不能得到保证,我们称这类网络为容延迟移动传感器网络(DTMSN, Delay Tolerant Mobile Sensor Networks)^[4]。由于网络拓扑结构在不断变化,传统的确定性路由(Deterministic Routing)的方式并不适用 DTMSN,因此,设计适合于 DTMSN 且性能优的动态路由算法显得十分必要和迫切。

机会路由(Opportunistic Routing)^[5]被广泛用于 DTMSN 路由算法的研究,由于采用了伺机发送的思想,因此节点将数据发送至 Sink 前,不需要预先建立到达目的节点的路径。传染路由(ER, Epidemic Routing)^[6,7]结合了洪泛(Flooding)^[8]与机会路由的思想,是对洪泛(Flooding)的优化与改进,每当网络中的节点与其他任何一个节点相互连通时,该节点将复制本地发送队列中对方未包含的数据包,并发送给对方。为了减少网络中的数据冗余,直接传送(DT, Direct Transmission)机制^[9]也经常应用于 DTMSN 的路由算法研究。除此之外, Y. Wang 等人^[10]针对移动传感网提出了基于数据复制的高效数据传输策略 RED(Replication-based Efficient Data delivery),并引入纠错码(eraser coding)来提升网络的数据传输效率; Jinqi Zhu 等人^[11]提出了 MPAD(Mobility Prediction-based Adaptive Data gathering protocol)算法,通过对节点移动路径的预测与节点发送队列的管理,避免了数据的盲目发送。

本文针对 DTMSN,根据分析网络中节点的移动规律以及数据包在节点中的生存周期(记作 K),统计出各节点在 $t(t \leq K)$ 个时间槽(time-slot)内与 Sink 连通的概率分布,提出基于节点

本文受国家自然科学基金项目(61174023),浙江省自然科学基金(Y1110791, Y1110880, Y1090766)资助。

卢文伟(1979-),男,硕士,讲师,主要研究方向为无线网络路由算法、网络编码, E-mail: lww@zafu.edu.cn; 李光辉(1970-),男,博士,教授, CCF 会员,主要研究方向为无线传感器网络可靠性、容错计算; 冯海林(1980-),男,博士,副教授,主要研究方向为复杂系统建模、无线传感器网络、智能信息处理等。

概率分布传送(PDT, Probability Distribution based Transmission)的路由算法。使得网络在保持较高的数据包到达率的同时能大大减少网络中的数据冗余,减少网络中数据的发送次数,并降低网络能耗。此外,本文提出的路由算法为分布式的机会路由算法,节点根据自身及邻居点的信息自主产生策略并择机发送数据,具有较高的鲁棒性与实用性。

2 网络模型与概率分析

2.1 网络模型

为方便研究,假定网络中有 N 个节点,记为集合 $G = \{n_i | i = 1, 2, \dots, N\}$, 其随机地分布在 $M \times M$ 的正方形平面区域中,网络中的点以二维坐标表示,网络中唯一的汇聚点(Sink)固定在区域的中心,即坐标原点 $O(0,0)$ 位置。所有节点均有统一不变的发送功率和发送半径(记作 R)。同时,我们还假设:

(1)网络中的所有节点(Sink 除外)均以速度 v 不间断地移动,移动规律遵循 random waypoint^[12] 运动模型。

(2)网络将时间划分为若干时间槽(time-slot),每个节点以时间槽为单位尝试进行数据发送。

(3)利用无线传感器网络的同步算法^[13],所有节点保持时间上的同步。

(4)通过定位算法^[14],网络中的节点能周期性获得自身当前所处坐标位置和移动目标点的坐标位置。

2.2 概率分析

注意到在 DTMSN 中,根据当前所处位置与移动方向的不同,各节点与 Sink 点的连通概率也各不相同,同时,单一节点在不同时间槽数内与 Sink 点连通的概率也不一样。记 T 为单个节点接收到数据包后能够与 Sink 单跳通信并将数据发送给 Sink 所经历的时间槽个数, $P_i\{T \leq t\}$ 为节点 n_i 在 t 个时间槽内能与 Sink 单跳通信的概率。本文通过分析统计出 $t = 1, 2, \dots, K$ 时 $P_i\{T \leq t\}$ 的分布信息,并以此为依据,各节点自主决定发送队列中各数据包的发送策略。

分别记 $LC_i(x_{i,c}, y_{i,c})$ 和 $LD_i(x_{i,d}, y_{i,d})$ 为节点 n_i 当前所处的坐标点位置与移动目标点的坐标点位置,则当前点与目标点之间的距离 $D_i = \sqrt{(x_{i,c} - x_{i,d})^2 + (y_{i,c} - y_{i,d})^2}$ 。

容易得到,当 $t=0$ 时:

$$P_i\{T \leq t\} = \begin{cases} 0, & \sqrt{x_{i,c}^2 + y_{i,c}^2} > R \\ 1, & \sqrt{x_{i,c}^2 + y_{i,c}^2} \leq R \end{cases} \quad (1)$$

根据假设,网络中所有节点的移动符合 random waypoint 运动模型,节点将以直线运动的方式向目标点移动。记 $L_i(x_{i,t}, y_{i,t})$ 为节点 n_i 经过 $t (t \leq K)$ 个时间槽的运动之后所处的位置。当节点到达目标点 $LD_i(x_{i,d}, y_{i,d})$ 并随机产生下一目标点前,即 $0 < t \leq \frac{D_i}{v}$ 时(如图 1 所示),容易得到:

$$\begin{cases} x_{i,t} = \frac{tv}{D_i}(x_{i,d} - x_{i,c}) + x_{i,c} \\ y_{i,t} = \frac{tv}{D_i}(y_{i,d} - y_{i,c}) + y_{i,c} \end{cases} \quad (2)$$

记 $D_{i,t}$ 为 $L_i(x_{i,t}, y_{i,t})$ 与 Sink 的距离,则:

$$D_{i,t} = \sqrt{x_{i,t}^2 + y_{i,t}^2} \quad (3)$$

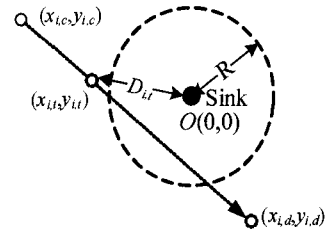


图 1 节点 n_i 的移动

将式(2)代入式(3),可以得到当节点 n_i 移动到目标点前,经过 $t (t \leq K)$ 个时间槽的运动后与 Sink 点的距离为:

$$D_{i,t} = \frac{\sqrt{(tx_{i,d} - tx_{i,c} + D_i x_{i,c})^2 + (ty_{i,d} - ty_{i,c} + D_i y_{i,c})^2}}{D_i} \quad (4)$$

式中, $0 < t \leq \frac{D_i}{v}$ 。

由于网络中节点的发送半径为 R ,则当存在 t 使得 $D_{i,t} \leq R$ 成立时,节点 n_i 就能与 Sink 直接通信。因此,可以得到:

$$P_i\{T \leq t\} = \begin{cases} 1, & P\{T \leq t-1\} = 1 \text{ 或 } D_{i,t} \leq R \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $0 < t \leq \frac{D_i}{v}$ 且 $t \leq K$ 。

当节点 n_i 到达目标点 $LD_i(x_{i,d}, y_{i,d})$ 后,节点将在 $M \times M$ 的正方形区域中随机选择一个点,将其作为下一个目标点继续移动,节点缓存队列中的数据包仍将被择机发送。考虑到目标点与 Sink 的距离,我们设定:

$$P_i\{T \leq t\} = \begin{cases} 1, & P\{T \leq t-1\} = 1 \\ \frac{R}{D_{i,d}}, & \text{其它} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\frac{D_i}{v} < t \leq K$, $D_{i,d} = \sqrt{x_{i,d}^2 + y_{i,d}^2}$, 即点 $LD_i(x_{i,d}, y_{i,d})$ 与 Sink 的距离。

3 路由算法及其实现

由于节点不断移动,DTMSN 中各节点之间以及单一节点在不同的时间槽内均有不同的概率与 Sink 连通。在上节中,通过分析得到了各节点基于时间槽数与 Sink 点连通的概率分布。在此基础上,各节点将根据自身及其邻居点的概率分布信息做出数据传送策略,形成分布式的路由算法,使得网络中的数据在以高概率成功传递到 Sink 的同时具有低冗余、低能耗等特征。

类似于以往传感器网络的路由算法研究^[15,16],本算法中的节点把即将发送的数据包(自身产生或作为中继接收的数据包)缓存于队列中。为了合理、高效地利用与管理缓存空间,对每个数据包均设置一个值 ST ,用于标识其在节点中的生存时间。当数据源节点产生新的数据包或中继节点接收到数据包时,将该数据包缓存于发送队列中,并设置 $ST=0$,每经过一个时间槽的时间, ST 的值加 1,当 $ST > K$ 或该数据包被发送至 Sink 时,节点自动将该数据包丢弃。

假设节点 n_i 的发送队列中含有 a 个数据包准备发送,分别为 $PC_i(1), PC_i(2), \dots, PC_i(a)$, 则每个数据包均有各自的生存时间,记为 $ST_i(1), ST_i(2), \dots, ST_i(a)$ 。首先, n_i 通过握手过程与通信范围内的节点建立联系,并形成邻居集,记作 $S_i; n_i$ 从邻居集中根据各节点与 Sink 点连通的概率分布,选

择出最短时间内最大概率值的节点作为备选节点。为平衡网络中节点的剩余能量,从中选择剩余能量最大的节点作为接收节点,假设为点 n_j ; 如果 n_j 最短时间内与 Sink 连通的 最大概率值大于 n_i 中相应的值,则将 n_i 发送队列中 (n_j 队列中未包含) 的数据包复制并发送至 n_j 。算法具体实现的伪代码如图 2 所示,其中 $P_{i-\max-value}$ 为节点 n_i 的邻居集中所有节点的最大概率值, S_{\max} 为邻居节点中在最短时间内达到该概率值的节点集, $P_{i-\max}$ 为节点 n_i 的最大概率值。

```

For each time-slot do
  For every node  $n_i \in G$  do
    Form  $S_i$ , the neighbor set of  $n_i$  by shake hands
     $P_{i-\max-value} = \max(P_v \{T \leq t\})$ ,  $n_v \in S_i$ ,  $t = 1, 2, \dots, K$ 
    Get the set  $S_{\max}$  from  $S_i$ , in which, node reach the value  $P_{\max}$  with minimal  $t$ 
    Choose the node  $n_j$  from  $S_{\max}$ , which has the biggest residual energy
     $P_{i-\max} = \max(P_i \{T \leq t\})$ ,  $t = 1, 2, \dots, K$ 
     $P_{j-\max} = \max(P_j \{T \leq t\})$ ,  $t = 1, 2, \dots, K$ 
    For every packet  $PC_i(e)$  contained in  $n_i$ 's queue do
      If  $P_{i-\max} < P_{j-\max}$  and  $PC_i(e)$  is not contained in  $n_j$ 's queue, then send  $PC_i(e)$  to  $n_j$ 
    End For
  End For
End For

```

图 2 基于概率分布的机会路由算法

4 实验与分析

在实验中,假设各传感器节点的移动依赖于其载体,如斑马网^[2]、车载传感网^[3]等,不需要消耗自身能量,因此,在忽略其它消耗(如保持时间同步、物理计算等)情形下,传感器节点的能耗仅考虑用于数据传递过程中能量的消耗。各节点具有相同的初始能量 $E_{initial}$,且每个节点在每个时间槽均产生一个新的数据包并发送。采用文献^[9]的能耗模型,即节点接收一个 l bit 数据包的能耗为:

$$E_{Rx}(l) = lE_{dec} \quad (8)$$

根据节点固定的发送半径 R ,将 l 比特数据从一个节点发送到另一个节点所消耗的能量为:

$$E_{Tx}(l) = l(E_{dec} + \epsilon_{amp} R^\gamma) \quad (9)$$

式中, E_{dec} 为电路上接收或发送每比特数据的能耗; ϵ_{amp} 是信号放大所消耗的能量; γ 是路径损耗系数,一般取值范围在 $[2, 4]$ 之间。与文献^[9]相同,取路径损耗指数 $\gamma = 2$, $E_{dec} = 50nJ/bit$, $\epsilon_{amp} = 10pJ/bit/m^2$ 。其余参数的缺省取值如表 1 所列。

表 1 各参数的缺省值

参数	符号	缺省值
区域大小(m^2)	$M \times M$	200×200
节点数(个)	N	100
初始能量(Joule)	$E_{initial}$	2
发送半径(m)	R	20
节点移动速度(m/time-slot)	v	10
数据包生存周期(time-slot)	K	20
数据包大小(bite)	l	50

在具体的实验中,将本文提出的 PDT 与 DT、ER 及 MPAD 算法在成功传递至 Sink 的数据包数与成功传递一个

数据包网络中平均发送次数两方面的性能进行比较分析。ER 是类似于 Flooding 的路由机制,能最大限度地利用网络的空间资源,让尽可能多数据包到达 Sink; 而 DT 是单跳的数据传送机制,只有节点与 Sink 连通时,才将源数据直接传递至 Sink。可以看到,在数据包到达数、成功传递一个数据包网络中平均发送次数方面,ER 与 DT 算法分别能达到最佳效果,但均以极大降低另一性能为代价。本文提出的 PDT 算法能使网络中各性能均达到较高的效果,使得网络在保持较高的数据包到达率的同时,能大大减少网络中的数据冗余,减少网络中数据的发送次数,降低网络能耗。

首先,当节点的移动速度发生变化时,分析其对算法性能的影响并加以比较,当节点移动速度 $v = 5, 10, \dots, 55$, 其余参数缺省时,可以得到图 3 和图 4 所示的结果。我们看到当节点的移动速度增加时,本文提出的 PDT 算法在各项性能上均接近于相应的性能最佳算法; 当节点的移动速度足够快时,网络中数据包的到达个数非常接近于 ER 算法,同时保持着接近于 DT 算法的数据冗余度。与此同时,本文提出的算法在数据包的平均发送次数上明显优于 MPAD 算法。这表明在节点移动速度较快的网络环境中,本算法在保持较高的数据包到达率的同时,能较好地控制网络中的冗余数据,更能体现该算法的优异性,提升网络性能。

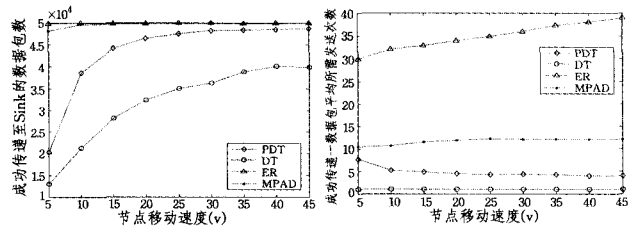


图 3 节点移动速度对数据包到达个数的影响 图 4 节点移动速度对成功发送一数据包平均发送次数的影响

图 5 和图 6 显示的是当数据包在节点中的生存周期不同时,生存周期对算法性能的影响及与 DT、ER 和 MPAD 算法的比较,设置 $K = 10, 12, \dots, 30$, 其余参数缺省。从图中可以得到,当数据包的生存周期增加时,网络中数据包的到达数增多,但这是以增加节点存储空间为代价的。当生存周期足够大时,本文提出的 PDT 算法在各项性能上均接近于性能最佳的算法。这表明,当网络中的节点具有足够的存储空间,可以使得数据包在节点中的生存周期较长时,本文提出的算法性能优异。

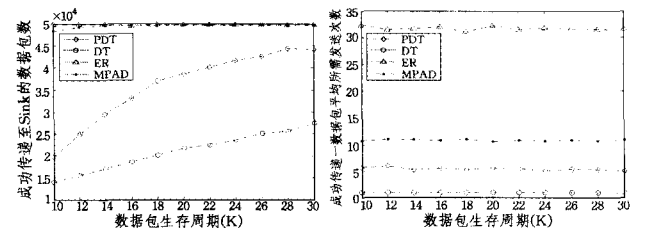


图 5 数据包生存周期对数据包到达个数的影响 图 6 数据包生存周期对成功发送一数据包平均发送次数的影响

让节点数 $N = 20, 30, \dots, 120$, 其余参数缺省时,分别比较不同路由算法成功传递至 Sink 的数据包数与成功传递一个

数据包网络中的平均发送次数,可以得到图 7 和图 8 所示的结果。从图 7 可以看到,随着节点数的增加,本文提出的 PDT 和 DT、ER 及 MPAD 算法成功传递至 Sink 的数据包数也稳步增加。这是由于在节点数增加的同时,产生的总数据包数也在增加,而且每个节点(包括 Sink)的邻居数也相应增加,这使得更多的节点有机会将数据包成功传递至 Sink。

数据到达率的增加往往伴随着较高的数据冗余,图 8 显示的是成功发送一个数据包至 Sink 时,网络中平均发送数据包的次数。由于 DT 单跳将数据直接传送至 Sink,因此成功传递一个数据包只要一次发送。结合图 7 和图 8 可以得到,当节点数 N 增加时,在 ER 算法成功传递数据包数增加的同时,数据包的发送次数也急剧增加,这会大大增加网络负担,产生数据阻塞、同频干扰以及耗能增加等一系列负面影响;然而本文提出的 PDT 算法在保持较高的数据包到达率的同时,能较好地控制网络中的冗余数据,使得网络中成功传递一数据包所用的平均发送次数稳定保持在一个较低的水平。这表明,本文提出的算法适用于节点数多的网络。

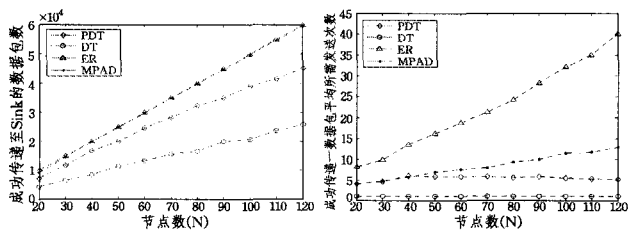


图 7 节点数对数据包到达个数 图 8 节点数对成功发送一数据包平均发送次数的影响

让传感器节点的发送半径 $R=3, 6, \dots, 33$, 其余参数缺省, 分别比较不同路由算法成功传递至 Sink 的数据包数与成功传递一个数据包网络中平均发送次数, 可以得到图 9 和图 10 所示的结果。从图 9 可以看到, 随着发送半径的变大, PDT、DT、ER 及 MPAD 算法成功传递至 Sink 的数据包数也稳步增加。这是由于在发送半径变大时, 每个节点的邻居数也相应增加, 能使得更多的节点有机会将数据包成功传递至 Sink。同时, 我们还可以得到, 当传送半径达到一定的值(大于 12)时, 本文提出的 PDT 算法成功传递的数据包数趋于稳定, 这是因为网络中产生的数据包总数是固定的。从图 10 可以看到, 随着发送半径的增加, 本文提出的 PDT 路由算法成功传递一个数据包平均所需的发送次数逐渐减小并趋向于 DT 算法, 而 ER 算法的相应值却在增加。这表明, 当网络中节点的发送半径足够大时, 本文所提算法的各项性能趋向最佳, 其优异性更加显著。

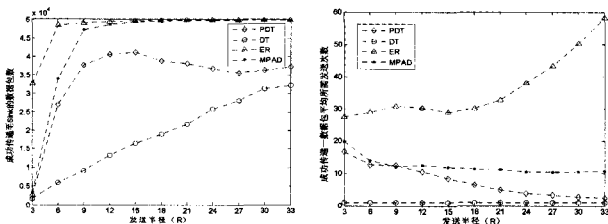


图 9 发送半径对数据包到达个数的影响 图 10 发送半径对成功发送一数据包平均发送次数的影响

传感器节点有限存储及能量等因素的影响, 数据包在汇聚至 Sink 过程中往往伴随着较高的丢包率与数据冗余。在直接传送(DT, Direct Transmission)机制中, 节点将数据包单跳直接传送至 Sink 点, 虽然不产生冗余数据包, 但由于节点可能长期不能与 Sink 直接连通, 且传感器节点存储空间非常有限, 这使得网络中大量的数据包被丢弃, 大大降低了网络的实用性。在传染病路由(ER, Epidemic Routing)机制中, 节点在数据传递中采用类似洪泛(Flooding)的思想, 虽然能有很高的数据包到达率, 但这是以极高的数据冗余为代价的, 这在传感器网络中往往会产生数据堵塞、网络生存周期低等影响。本文提出的基于节点概率分布传送(PDT, Probability Distribution based Transmission)的路由算法, 能在保持较高的数据包到达率的同时, 大大减少网络中的数据冗余, 减少网络中数据的发送次数, 降低网络能耗。同时, 本文提出的算法在节点数多、传输距离大、节点移动速度快以及节点存储空间足够的网络环境中各项性能均接近于最佳, 极大地提升了网络性能。此外, 本文提出的路由算法为分布式算法, 节点根据自身及邻居点的信息自主决定发送策略, 具有较高的实用性和鲁棒性。

参考文献

- [1] 崔莉, 鞠海玲, 苗勇, 等. 无线传感器网络研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 163-174
- [2] Juang P, Oki H. Energy-efficient computing for wildlife tracking; design tradeoffs and early experiences with ZebraNet[C]// Proceedings of the 10th international conference on Architectural support for programming languages and operating systems. 2002; 96-107
- [3] Coronato A, Pietro G. A Framework for Engineering Pervasive Applications Applied to Intra-vehicular Sensor Network Applications[J]. Mobile Networks and Applications, 2010, 15(1): 137-147
- [4] Leguay J, Friedman T, Conan V. DTN routing in a mobility pattern space[C]// Proceedings of ACM SIGCOMM'05 Workshop on Delay Tolerant Networking and Related Topics. Philadelphia, ACM Press, 2005; 276-283
- [5] Biswas S, Morris R. Opportunistic routing in multi-hop wireless networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2004, 34(1): 69-74
- [6] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra C S. Efficient routing in intermittently connected mobile networks; the multiple-copy case [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking(TON), 2008, 16(1): 77-90
- [7] Mundur P, Seligman M. Delay tolerant network routing: Beyond epidemic routing[C]// 3rd International Symposium on Wireless Pervasive Computing. May 2008; 550-553
- [8] Wang Yu, Wu Hong-yi. Delay/Fault-Tolerant Mobile Sensor Network(DFT-MSN): A New Paradigm for Pervasive Information Gathering[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(9): 1021-1034
- [9] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for Wireless micro-sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670

结束语 在容延迟移动传感器网络中, 受到节点移动、传

(下转第 203 页)

物联网是联系自然界和人类社会的复杂网络,普遍存在小世界现象、无标度特性、健壮性、安全性、动态随机性、统计分布性和进化稳定性^[7]。有关复杂网络的综述和研究在2005年后不断涌现^[8-10],研究内容主要包括非线性动态复杂网络系统(物理系统、互联网和相关社会网络)、网络科学理论框架、复杂性与普适性、动力学同步与控制方法等。

物联网具有广泛的学科交叉性,研究其规律必然涉及众多学科的背景知识和基础理论。物联网的自反馈特性、“3C”技术特性可以利用现代控制论、现代通信理论、云计算理论进行研究;其复杂网络特性和复合生态系统特性可以利用网络科学、数学物理、系统工程、复合生态系统等理论进行研究。本文给出一种基于现有科学理论组成的物联网理论基础体系,如图4所示。

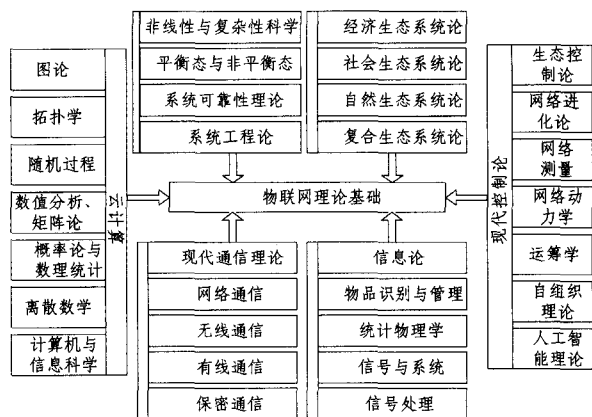


图4 物联网相关理论基础体系

结束语 物联网是人类通过信息关联来调控自然-经济-社会复合生态系统的科学,不仅遵从自然界的“物理”,也遵从人类活动的“事理”和人类行为的“情理”,其最大特点是从“物”出发,对“事”与“情”进行调理,强调应用策略的可行性,即合理、合法、合情、合意。

当我们在为获得对物的至高无上的控制权而暗自庆幸时,也不得不为丧失这种特权而面临灭顶之灾而深感忧虑。物联网科学无疑是寻找这二者之间最佳平衡点的一种选择。

本文研究了物联网的基本特征,指出了物联网理论研究的一些基本问题,如智能性、群聚性、生命周期性、复合生态性,并以此为基础构建了一种初步的物联网相关理论基础体系。就物联网的基础理论体系而言,远非本文能够完成,但对其进行深入研究是作者不懈努力的方向。

参考文献

- [1] 国家重点基础研究发展计划 2010 年立项项目清单[J]. 中国基础科学, 2010(05)
- [2] AutoID Labs homepage[EB/OL]. <http://www.autoidlabs.org/>
- [3] International Telecommunication Union, Internet Reports 2005: The Internet of things[R]. Geneva:ITU, 2005
- [4] 黄映辉,李冠宇. 物联网语义、性质与归类[J]. 计算机科学, 2011(1): 31-33
- [5] ETSI TC M2M overview[EB/OL]. http://docbox.etsi.org/M2M/Open/Information/M2M_presentation.pdf, 2011-06-15
- [6] 马世骏. 社会-经济-自然复合生态系统[J]. 生态学报, 1984, 4(1): 1-9
- [7] 徐群叁,徐邦海,张晓峰. 基于能量驱动的网络进化稳定性博弈分析[J]. 计算机工程, 2009, 35(23): 98-33
- [8] Boccaiati S, Latora V, Moreno Y, et al. Complex networks, structure and dynamics[J]. Physics Reports, 2006, 424(4): 175-308
- [9] 周华任,马亚平,马元正,等. 网络科学发展综述[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(24): 7-10
- [10] 方锦清,汪小帆,郑志刚,等. 一门崭新的交叉学科:网络科学(下)[J]. 物理学进展, 2007, 27(4): 361-448

(上接第 177 页)

- [10] Wang Y, Wu H Y. Replication-based efficient data delivery scheme(RED) for Delay/fault-tolerant mobile sensor network (DFT-MSN)[C]// Proc. of Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops. Pisa, IEEE Press, 2006: 485-489
- [11] Zhu Jin-qi, Cao Jian-nong, Liu Ming, et al. A Mobility Prediction-Based Adaptive Data Gathering Protocol for Delay Tolerant Mobile Sensor Network[C]// Global Telecommunications Conference, IEEE GLOBECOM 2008. 2008: 1-5
- [12] Camp T, Boleng J, Davies V. A survey of mobility models for ad hoc network research[J]. Wireless Communication and Mobile Computing, 2002, 2: 483-502
- [13] Maroti M, Kusy B, Simon G. The Flooding Time Synchroniza-

tion Protocol[M]. USA: ACM Sensys, 2004: 30-37

- [14] Doherty L, Pister KSJ. Convex Position Estimation in Wireless Sensor Networks[C]// Proc of the IEEE Infocom. Vol. 3, Anchorage; IEEE Computer and Communications Societies, 2001: 1655-1663
- [15] Zhang Ke, Liu Ming, et al. Data Aggregation-based Adaptive Data Reproductive Delivery Scheme for Delay Tolerant Mobile Sensor Networks[J]. Chinese Journal of Electronics, 2010, 19(1): 175-180
- [16] Nirjon S M S, Stankovic J A, Whitehouse K. Heuristics for scheduling periodic real-time streams in wireless sensor networks[C]// Conference on Embedded Networked Sensor Systems. 2009: 385-386