

无线传感器网络的容量研究综述

刘雨¹ 望育梅¹ 邓辉²

(北京邮电大学信息工程学院 北京 100876)¹ (日立(中国)投资有限公司研究开发中心 北京 100004)²

摘要 集成了传感器、微机电系统和无线通信三大技术而形成的无线传感器网络是一种全新的信息获取和处理技术。本文介绍了有关无线传感器网络的容量研究的理论基础和研究现状,从网络模型、基本理论和主要结论等几个方面重点分析和比较了几种当前的研究思路,并主要阐述了有关多用户分集技术、中继网络和多天波束成形技术在求解无线传感器网络的容量方面的应用。最后指明了将来的工作。

关键词 无线传感器网络,网络信息论,网络容量

The Capacity Problem of Wireless Sensor Networks

LIU Yu¹ WANG Yu-Mei¹ DENG Hui²

(School of Information Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)¹

(Hitachi(China)Investment Ltd. R&D Center, Beijing 100004)²

Abstract This paper introduces the background, basic theories and current researches on the capacity problem of wireless sensor networks, analyses and compares the research methods on the view of network models, basic theories and main results on the scaling law of the capacity, and introduces the means of multi-user diversity technology, relay networks and multi-antenna technology in details. Finally, the future work is pointed out.

Keywords Wireless sensor networks, Network information theory, Network capacity

1 简介

集成了传感器、微机电系统和无线通信三大技术而形成的无线传感器网络(WSN, Wireless Sensor Network)是一种全新的信息获取和处理技术,作为一种将在未来十年占主导地位的新的技术趋向,WSN 由于其能量受限、数据相关和多跳通信的特点,对研究者们提出了许多挑战。本文我们集中介绍和讨论有关 WSN 的容量方面的研究。

容量问题向来是通信和信息领域研究的热点和难点问题。对于传统的点到点通信,信息论提供了一系列工具来求解最佳编码系统的性能,比如分离原理^[1]认为当且仅当信源熵小于信道容量时,才可以在信道上无损地传送,这使得我们可以用熵速率来标识信源,而用信道容量来标识信道。

WSN 是由具有感知、计算和通信能力的微型传感器节点,以 Ad hoc 的组网方式构成的网络以实现无连接的多跳通信,其具有独特的应用情形,比如,多个传感器节点同时监测到一个(或几个)随机过程,各自产生的信号之间具有相关性;各节点将信号通过多跳路由发送到同一个接收节点即 Sink 节点上。因此在 WSN 中,我们需要研究多个相干信源在多对一信道条件下的多跳通信的网络容量。

所谓的多跳通信是指从源节点到目的节点的路由可以经过一个或者多个其他节点的中继,同时这些中继节点本身也可以作为其他通信连接的源端或者目的端,即任何节点可能同时扮演数据的发送者、接收者和中继者三种身份。针对这种多跳通信的特点,容量研究主要基于图论,结合无线媒体条件下信号的传输特点,比如广播、衰减和干扰模型来进行。

多相关信源是 WSN 区别于无线网络的主要特征之一。

为了增加监视任务的可靠性和降低因为传感器节点自身能量耗尽带来的损失,在初始配置时,通常通过增大节点的密度来增加通信的可靠性。这使得多个节点能够监测同一个随机过程,导致这些节点产生的数据之间具有某些相关性。Slepian-Wolf^[2]编码认为只要编码后的总速率大于相关信源的联合熵,即可以无损地传送对相关信源进行单独编码后的信息。

多接入信道^[2]是 WSN 区别于无线网络的又一主要特点。WSN 中配置一个接收节点,用以接收来之不同的传感器节点的数据,这种多对一的业务情形是我们在研究其容量问题时需要重点考虑的。在多接入信道中,发送端不仅需要与接收端的噪声竞争,还需要与来之其他发送端的干扰竞争。

通过上面的简短介绍和讨论,我们希望传达这样的信息:无线传感器网络的容量问题具有相当挑战性。

2 无线网络的容量

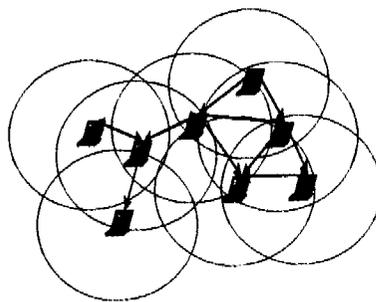


图1 无线 Ad hoc 网络结构

我们从无线网络入手介绍有关多跳通信的容量的研究。

无线网络中,没有固定的网络结构,节点以自组织的方式构成网络,每个节点可以同时作为发送者、接收者和中继节点,如图1所示。这种多跳通信的特点为无线网络容量的研究提出了严峻的挑战。目前有关无线网络的容量的研究主要是从图论、多用户分集技术和中继网络的方面进行讨论。下面我们从网络模型、研究所基于的理论和研究结论等几个方面,将几种主要的研究方案做简单介绍和分析,以理清有关这一问题的研究脉络。

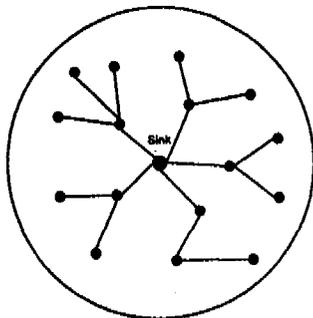


图2 WSN的网络结构

2.1 无线信道共享制约了网络容量

Gupta 和 Kumar 的文[3]是研究无线网络容量的经典文章。文中研究的网络模型为:i) N 个节点分布在面积为 1m^2 的平面圆形区域内;ii) 在公共无线信道上,每个节点可以传送的速率为 W 比特每秒;iii) 包以多跳方式从一个节点传到另一个节点,直至最终的目的节点。定义了在一跳上成功接收的协议模型和物理模型,利用图论中有关 Vapnik Chervonenkis 维数的相关知识,得到的结论认为,由于无线多跳网络中的每个节点需要与邻居范围内的其他节点共享所使用的无线信道,导致了容量上的限制,使得可以获得的网络容量仅为 $\Theta(\sqrt{n})$ 。随着节点数目的增多,每节点的吞吐量 $\Theta(1/\sqrt{n})$ 趋近于零。因此更倾向于组建拥有较少数目节点的网络,或组建那些节点主要与邻居节点进行通信的网络。

文中推导容量时所采用的编码模型为简单的点到点编码模型,即在任何时候,接收者只对某个发送者发来的消息进行解码,而把同时传送的其他节点信息纯粹视为噪声;同样,在任何时候,发送者只向某个接收者发送信息。从这种意义上讲,它没有从信息理论的角度来解答容量的问题。换句话说,在同样的物理限制条件下,如采用更好的编码策略,我们能获得更高的网络容量。

2.2 利用多用户分集技术增加网络容量

分集技术是应对无线信道时变特性的一个重要方法,分集可以是时间上的(如插入码比特)、频率上的(如结合 CDMA 系统中的多径)或空间上的(如多天线),其基本思想是通过发送器和接收器之间的多个独立的信号路径来提高性能。Grossglauser 和 Tse^[4] 提出在 WSN 中利用节点的移动性进行分集将网络容量提高到 $O(n)$,要求每个源节点将自己的包发送给尽可能多的其他节点,由这些节点将作为中继节点。当任何中继节点接近于最终目的节点时,就将包递交给目的节点。其指导思想是:如果存在多个中继节点,则至少有一个节点在移动中将会靠近目的节点的概率很高;另一方面,每个包至多经过一个中继节点,即最多经过两跳,保证了较高的吞吐量。

这种方法利用节点的移动性带来的多用户分集,有效地通过将包分发给多个具有独立时变信道的不同中间节点,提

高了网络容量。但是此时容量的增加是以时延的增大为代价,只有在不考虑网络时延的条件下,单个源目的节点对 $O(1)$ 的吞吐量容量才是可达的。

2.3 中继模式对容量的改进

无线网络中另一种重要的应用模式为中继网络,Michael 和 Martin 在文[5]中对此进行了研究。随机选择两个特殊节点作为源和目的节点,其他节点都作为中继节点辅助其传输,允许节点间进行任意的合作。比如源节点可以使用任意复杂的编码和解码算法,中继节点之间可以相互交换信息进行协作传输以降低干扰,以利用多址接入和广播编码技术来增加整体的有效性(文中称之为网络编码,与点到点编码相对应)。文中认为该应用情形下的容量上界为拥有一个发送天线和 $n-1$ 个接收天线的多天线信道的容量,下界则考虑采用无编码方式在高斯中继网络中进行传输,并且证明了当网络节点数 N 趋于无穷时,上下界重合,得出容量为 $O(\log N)$ 的结论。

无线网络的容量问题研究引起较多关注,研究思路从最初的只考虑简单的点对点编码,到利用节点的移动性进行多用户分集、以及考虑多中继网络容量,即由传统的信息论向着多用户信息论的方向发展。

3 无线传感器网络的容量

与传统的无线网络相比,WSN 除具有多跳通信的特点外,还具有多对一的业务情形和数据相关性的特点。在 WSN 中,任一源节点的目的节点都是 Sink 节点,因而使得 Sink 节点成为整个网络的瓶颈;不同的节点同时对某一个随机过程进行监测,因此相邻节点产生的信息相互之间具有相关性,而且这种相关性随着节点密度的增大而增大,即随着 $N \rightarrow \infty$,单个节点的业务量趋于零。下面我们从 Sink 瓶颈、波束成形和多模网络几个方面分析 WSN 中的容量问题。

3.1 Sink 瓶颈制约了网络容量

文[6]是最早开始 WSN 容量的文章,其中所研究的网络模型如图2所示, N 个传感器节点均匀分布在单位面积的平面圆内,Sink 节点位于圆心处;传感器节点在相同的频率上发送数据,应用类 TDMA 机制,按照事先制定的时间表使得各个节点在各自时隙上进行发送。在这种网络情形下,直观上看 Sink 节点成为整个网络的瓶颈,使得可用带宽在节点之间进行划分。

文中通过连接图、染色性和度数等概念和理论,推导出单节点的吞吐量为 $\lambda = \Theta(W/n)$ 的结论。由于文中没有运用任何信息论的思想,因此只是依照 Sink 节点为整个无线网络的通信瓶颈这一特点得到的单节点吞吐量为 $\Theta(1/n)$ 的结论过于严格。

3.2 波束成形技术提高了网络容量

文[7]研究了所有节点的总平均功率受限条件下的多对一密集无线网络的传输容量,其中 N 个传感器节点均匀分布在单位半径的圆周上,收集节点位于圆心,则所有的源节点与圆心的距离相同。其主要思想是:在密集网络中,由于传感器节点距离很近,相互之间进行无线传输的代价很小,因此允许源传感器节点在第一时隙以速率 $\alpha \log(N)$ 将产生的信息发布给位置相近的邻居节点,设周围的 $N^{-\gamma_{1,j}}$ 个节点能成功接收到该信息;第二时隙内,由这 $N^{-\gamma_{1,j}}$ 个邻居节点相互协作,通过波束成形的方式将该消息发送给 Sink 节点,此时的信道相当于多发一收的多天线信道。由于波束成形带来的增益,接收功率呈对数倍增长,从而网络容量也对数倍的增长为 Θ

$(\log(N))$, 则单个节点的传输容量为 $\Theta\left(\frac{\log(N)}{N}\right)$ 。

WSN 中节点数据之间的相关性使得这一通信方式更为有效, 如各个节点预先知道所观察到信息的联合分布, 则可使用 Slepian-Wolf 编码对分布式相干信源进行编码, 进一步降低了相邻节点间的通信成本。

3.3 多模网络利用空间复用提高容量

文[8]是在文[7]的基础上所做的进一步拓展, 提出将在圆心处配置多个收集节点, 每个收集节点致力于收集不同过程的信息。利用了无线信道的空间复用, 则 WSN 可同时观察到多个过程。这种多个收集器节点的配置解决了多对一信道中收端的瓶颈现象, 即网络可以同时观察到 $O(N^{\beta})$ 个过程, 且为每个过程提供的传输容量可达 $\Theta(\log(N))$ 。

3.4 源信道编码技术提高容量

文[9]在传感器节点仅具有传输能力时, 提出一种统计合作的源信道编码技术来提高网络容量, 即基于同时传送的 LDGM 码, 将信源之间的相关性与传输的信号之间的相关性

对应起来, 提出一种基于低密度生成矩阵码的低复杂度的合作源信道编码方案。该方案对应于在高斯多接入信道上进行相关信源的传输的低复杂度的盲协作方案, 遵守了文[1]中给出的信息论的导向来最大化多对一信道的容量, 但并没有给出该条件下容量的扩展性规律。

4 分析和比较

目前有关无线网络容量问题的研究往往是基于不同的业务情形(一对一信道与多对一信道)、不同的信源特性(无相关性与相关信源)、甚至不同的网络模型(二维平面上的单位面积的圆与一维的单位半径的圆周)来进行的, 但不同研究之间仍具有共通性, 都试图通过最优的信源编码、功率控制或多址机制等来达到网络信息论的理论界。下面我们从网络模型、提出的机制以及研究所基于的理论基础等几个方面对以上相关研究进行分析和比较, 见表 1。

表 1 各种方案的比较

文章	网络模型	机制与理论基础	结论	备注
[3]	平面上单位面积的圆, 节点静止	成功接收的协议模型和物理模型、图论、点对点的编解码	$\Theta(\sqrt{n})$	里程碑式的文章
[4]	节点运动, 一跳中继	利用移动性带来的多用户分集技术	$O(n)$	Best Paper Prize of Infocom02
[5]	中继网络, 一对源目的节点对	网络编码 最大流最小割定理	$\Theta(\log n)$	从网络信息论角度解释无线网络的容量问题
[6]	多对一的网络情形	图的染色理论 Sink 节点的瓶颈效应	$\Theta\left(\frac{1}{n}\right)$	针对无线传感器网络的特殊应用
[7]	节点分布于单位圆的圆周上, Sink 节点位于圆心	Slepian-Wolf 编码 天线共享	$\Theta(\log(N))$	考虑了信源信号之间的相关性
[8]	多模网络	波束成形 空间复用	vs $O(N^{\beta})$	—
[9]	确定性协作与统计性协作	波束成形 利用 LDGM 码保留信号之间的相关性	—	如何应用网络信息论理论解决容量问题

未来的工作 WSN 的容量问题仍有许多工作要做, 比如: 如何应用网络信息论的理论来确定相干信源和多对一信道的容量界; 如何在分离原理不是最优的情况下结合无线传感器网络的信源和信道特性进行联合编码; 如何应用多检测编码技术解决无线传感器网络的 CEO(Chief Executive Officer)问题等等。

参考文献

- Cover T M, Thomas J A. Elements of Information Theory [M]. Wiley, New York, 1991
- Slepian D, Wolf J K. Noiseless coding of correlated information sources [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, July 1973, IT-19: 471~480
- Gupta P, Kumar P R. The Capacity of Wireless Networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, March 2000, 46 (2): 388~404
- Grossglauser M, Tse D N. Mobility can increase the capacity of wireless networks [J]. IEEE INFOCOM 2001, Anchorage, Alaska, April 2001
- Gastpar M, Vetterli M. On the capacity of wireless networks,

The relay case, Annual Joint Conferences of the IEEE Computer and Communication Societies (INFOCOM), New York, New York, 2002

- Marco D, Duarte-Melo E J, Liu M, Neuho D. On the many-to-one transport capacity of a dense wireless sensor network and the compressibility of its data, International Workshop on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), Palo Alto, California, 2003
- Gamal H E. On the scaling laws of dense wireless sensor networks, IEEE Trans. Inform. Theory, Apr. 2003, submitted for publication.
- Gopala P K, Gamal H E. On the Scaling Laws of Multi-modal Wireless Sensor Networks, n. Annual Joint Conferences of the IEEE Computer and Communication Societies (INFOCOM), Hong Kong, 2004
- Murugan A D, Gopala P K, Gamal H E. Correlated Sources Over Wireless Channels: Cooperative Source-Channel Coding, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, August 2004, 22 (6)