

基于相继干扰消除的无线传感网低时延广播算法

焦贤龙 王 刚 田海琛 董 周 冯新喜 陈桂茸

(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

摘 要 近年来,传感器技术、嵌入式计算技术与通信技术迅猛发展且日益成熟,因此传感器节点日益小型化和智能化,促进了无线传感网在战场监视、智能交通、精准农业、建筑结构健康状况监测、灾难恢复、环境监控、医疗监护等军用和民用领域的广泛应用.广播的目的是将数据从源节点分发给网络中的所有节点,在无线传感网中主要用于路由发现和重要通知的发布等.无线传感网应用于战场情报获取或火灾监控等时延敏感领域时,需要将数据快速地从源节点广播给全网所有传感器节点,因此,设计一种低时延的广播算法具有非常重要的理论研究和实际应用价值.但是,由于无线信号传输的广播特性,节点的信号传输会对其干扰范围内所有节点的数据接收产生干扰,而信号干扰是影响广播时延的重要因素.在信号干扰约束下的最低时延广播问题是 NP(Non-Polynomial)难问题,因此难以设计出多项式时间的最优化算法.现有研究工作通常通过干扰避免调度方法来设计低时延的广播算法,虽然能避免信号之间的干扰,但是不能增加可并发传输的广播链路数目,进而有效地降低广播时延.为了有效地解决该问题,本文首先设计了一种贪婪广播算法 GreedyB.该算法通过构造宽度优先搜索树来实现网络节点的分层,依据覆盖节点数最多优先选为父节点的规则来构造广播树,最后采用逐层调度和干扰避免调度的方式来分配广播链路的传输时间片.在贪婪广播算法 GreedyB 的基础上,本文结合相继干扰消除技术设计了另一种广播算法 SICB,致力于进一步降低广播时延.与 GreedyB 算法不同,SICB 算法在分配传输时间片时,分析广播链路之间是否满足相继干扰消除的条件,条件满足时安排在同一时间片,不满足时进行干扰避免调度.本文通过理论分析证明了, GreedyB 和 SICB 两种算法都能提供正确的无信号干扰的广播调度方案,并且两种算法时间复杂度和空间复杂度都是多项式时间的.本文通过大量的仿真实验对所提算法进行了性能分析.仿真实验结果表明, GreedyB 和 SICB 两种算法在不同网络规模、最大传输距离、信号传输功率、噪声功率等网络参数下的广播时延都要低于现有的广播算法,性能优化率最高分别可达 43.5% 和 52.7%.

关键词 无线传感网;广播算法;干扰避免调度;相继干扰消除;链路调度;时间片分配

中图法分类号 TP393 **DOI号** 10.11897/SP.J.1016.2019.02526

Successive Interference Cancellation Based Low-Delay Broadcast Algorithms for Wireless Sensor Networks

JIAO Xian-Long WANG Gang TIAN Hai-Chen DONG Zhou FENG Xin-Xi CHEN Gui-Rong

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077)

Abstract In recent years, the rapid development and maturity of sensor technology, embedded computing technology and communication technology, along with the growing miniaturization and intellectualization of sensor nodes have promoted the wide application of wireless sensor network in military and civil fields, such as battlefield surveillance, intelligent transportation, precision agriculture, health monitoring of building structures, disaster recovery, environmental monitoring, and medical monitoring, etc. The purpose of broadcast is to distribute data from the source node to all the sensor nodes in the network, which is mainly used for routing discovery and important

收稿日期:2018-10-31;在线出版日期:2019-05-22. 本课题得到国家自然科学基金(61573017, 61402510)和中国博士后科学基金(2014M553686)资助. 焦贤龙, 博士, 讲师, 中国计算机学会(CCF)会员, 主要研究方向为无线传感网、人工智能、信息安全. E-mail: xljiao113@qq.com. 王 刚(通信作者), 博士, 教授, 主要研究领域为复杂网络、信息安全、无线传感网等. E-mail: wglxl@nudt.edu.cn. 田海琛, 学士, 主要研究方向为无线传感网. 董 周, 学士, 主要研究方向为无线传感网. 冯新喜, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为无线传感网、人工智能等. 陈桂茸, 博士, 讲师, 主要研究方向为无线传感网、人工智能、数据挖掘、信息安全等.

announcement in wireless sensor networks. When wireless sensor networks are used in the delay-sensitive fields, such as battlefield information acquisition or fire monitoring, the data need to be quickly broadcast from the source node to all the sensor nodes in the whole network. Therefore, designing low-delay broadcast algorithms has very great theoretical research significance and practical application value. However, because of the broadcast characteristics of wireless signal transmission, the signal transmission of nodes will interfere with the data reception of all nodes within the interference range, and signal interference is an important factor that affects broadcast delay. The minimum-delay broadcast problem under the constraint of signal interference is NP(Non-Polynomial)-hard, and it is difficult to design a polynomial-time optimal algorithm. Existing research work usually designs low-delay broadcast algorithms by using the interference avoidance scheduling method. Although these algorithms can avoid interference between signals, these algorithms cannot increase the number of broadcast links that can transmit concurrently, and thus cannot effectively reduce the broadcast delay. In order to solve this problem effectively, a greedy broadcast algorithm called GreedyB is first designed. The GreedyB algorithm layers the network nodes by constructing the breadth search tree. The broadcast tree is constructed according to the rule that the nodes that cover the most nodes will be first chosen as the parent nodes. Finally, the broadcast links are allocated through the methods of layer-by-layer scheduling and interference avoidance scheduling. On the basis of the greedy broadcasting algorithm GreedyB, this paper designs another broadcast algorithm called SICB by combining with successive interference cancellation technology, which is devoted to further reducing the broadcast delay. Unlike GreedyB algorithm, SICB algorithm analyzes whether the broadcast links meet the conditions of successive interference cancellation when the transmission time-slots are allocated. When the conditions are met, SICB algorithm schedules broadcast links at the same time-slot. When the conditions are not met, SICB algorithm does the interference avoidance scheduling. In this paper, through theoretical analysis, we prove that both GreedyB and SICB algorithms can provide correct broadcast scheduling schemes without signal interference, and their time complexity and space complexity are all polynomial time. In this paper, the performance of the proposed algorithms is analyzed through a large number of simulation experiments. The simulation results show that, GreedyB and SICB algorithms have lower delay than the existing broadcast algorithm under different network parameters including the number of nodes, the maximum transmission distance, the transmission power of the signal, the noise power and so on, and the performance optimization ratios are up to 43.5% and 52.7% respectively.

Keywords wireless sensor networks; broadcast algorithms; interference avoidance scheduling; successive interference cancellation; link scheduling; time-slot assignment

1 引言

作为物联网的核心组成部分,无线传感网采用中继节点以多跳路由转发的方式实现数据的传输,近年来在军用和民用的许多领域(包括战场监视、智能交通、精准农业、建筑结构健康状况监测、灾难恢复、环境监控、医疗监护等)展现出广阔的应用前景^[1].广播是无线传感网中非常重要的操作,负责将

数据从源节点传输给网络中所有其他的节点.在无线传感网的实际应用中,例如,战场情报数据获取应用中,通常要求广播时延尽可能低,从而让指挥员能够基于获取的战场情报数据实现快速的指挥决策,以赢得更多的战争优势;在火灾监控应用中,监控用户需要及时地获取指定区域的重要火情数据,以避免火灾造成重大损失^[2];在医疗监护领域,医生也需要及时了解患者的身体健康数据,以便设计更好的医治方案.这些无线传感网的应用都要求将

源节点的查询请求快速地分发给指定的网络节点,因此,研究低时延的广播算法对于无线传感网扩展应用范围具有非常重要的理论意义和实际应用价值。

值得关注的是,由于无线信号传输的广播特性,节点的信号传输会对其干扰范围内所有节点的数据接收产生干扰,而信号干扰是影响无线传感网广播时延的重要因素。文献[3]证明了,受信号干扰的影响,无线传感网中的最低时延广播问题是 NP(Non-Polynomial)-难问题,因而很难设计出一种多项式时间的最优化算法。

目前,无线传感网中的低时延广播问题已经成为学术界高度关注的研究热点。为了解决该问题,研究者们提出了许多近似算法^[3-16],通过近似最优来不断地优化广播时延,以逼近最优算法的性能,近似比不断减小,性能不断提升。这些研究工作考虑的信号干扰模型从最简单的图干扰模型和协议干扰模型开始,已发展到物理干扰模型^[17]。物理干扰模型属于累积干扰模型,不仅考虑到发送节点的无线信号会随距离增加而衰减的特性,而且考虑到接收节点的接收信号会受环境噪声和其他发送节点信号干扰的影响,因而能够更加准确地描述无线通信的实际特性。物理干扰模型下设计的链路调度策略能够有效地提高广播算法的实际性能,但是,需要考虑同时进行传输的所有数据链路,使问题更加复杂困难,研究面临的挑战更大。

然而,上述研究工作都是通过干扰避免调度技术来设计广播算法的,即当广播链路之间存在信号干扰时,通过分配到不同的时间片来避免相互之间的干扰。虽然干扰避免调度技术可以有效地减轻信号之间的干扰,但是却减少了可并发传输的广播链路数目,不利于降低广播时延。值得关注的是,相继干扰消除技术(Successive Interference Cancellation, SIC)^[18-24]能够在物理层从相互干扰的信号中解码出多个数据报文,是研究者近年来取得的重大突破。无论是理论上^[18-23]还是实验中^[24]的研究结果都证实了相继干扰消除技术在应用到无线网络中时能够有效地提高网络性能。

就目前查阅的资料看,尚无相关工作研究如何将相继干扰消除技术应用到低时延广播算法中。因此,为了有效地降低广播时延,本文首先提出一种贪婪广播算法 GreedyB(Greedy Broadcast)。该算法首先利用以源节点为根的宽度优先搜索树,对网络中的节点进行分层,然后采取覆盖节点数最多的优先

作为父节点的原则构造广播树,最后围绕广播树采用逐层调度和干扰避免调度的思想来进行广播链路调度。

此外,在贪婪广播算法的基础上,本文结合相继干扰消除技术来增加可并发传输的广播链路数目,提出另一种低时延的广播算法 SICB(SIC-based Broadcast),以期进一步降低广播时延。

本文的主要贡献在于:

(1) 构建了无线传感网网络模型,给出了物理干扰模型下最低时延广播问题的形式化定义。

(2) 提出了一种贪婪广播算法 GreedyB。该算法利用逐层调度和干扰避免调度的方法,对广播链路的传输时间片进行分配,有效地解决了信号干扰问题,但是可并发传输的广播链路数量受限。

(3) 结合相继干扰消除技术提出了另一种低时延的广播算法 SICB。该算法以贪婪广播算法 GreedyB为基础,并充分利用相继干扰消除带来的好处进行广播链路调度,放宽了链路干扰的限制,增加了可并发传输的广播链路数量。

(4) 通过理论分析证明了 GreedyB 和 SICB 两种算法的正确性、时间复杂度和空间复杂度。通过仿真实验,对比了两种算法与现有算法在不同网络规模、信号传输功率、噪声功率等参数下的广播时延。实验结果表明,与现有算法相比, GreedyB 和 SICB 两种算法分别最多能够将广播时延降低 43.5% 和 52.7%。

本文第 2 节介绍低时延广播算法的相关工作;第 3 节介绍网络模型并给出最低时延广播问题的形式化定义;第 4 节介绍相继干扰消除技术的基本理论;第 5 节提出贪婪广播算法 GreedyB;第 6 节提出基于相继干扰消除的低时延广播算法 SICB;第 7 节对两种算法的正确性、时间复杂度和空间复杂度进行分析;第 8 节通过实验对所提算法的性能进行验证;第 9 节讨论分析了在物理干扰模型与其他干扰模型下设计的广播算法的性能优劣;最后,我们总结本文的研究工作,并展望下一步的研究。

2 相关研究

低时延广播算法的目标是最大可能地降低广播时延,但是由于无线信号的广播特性会导致无线信号之间存在干扰,使得接收节点无法正确收到报文,因而需要精心选取转发节点并且对转发节点的传输时间进行调度。下面分别针对不同的信号干扰模型

来介绍低时延广播算法的相关研究。

(1) 图干扰模型

图干扰模型假设节点的信号干扰范围等于其传输范围,并且发送节点传输范围内的节点无法正确接收其他发送节点的数据。Gandhi 等人证明了图干扰模型下无线传感网的最低时延广播问题是 NP-难问题,并利用一种贪婪的方式提出了一种近似比为常数的低时延广播算法^[3]。

广播源的变化将导致许多传统算法需要重新构造广播树,从而带来较大的实现开销。针对该问题, Huang 等人^[4]首先构造不依赖于广播源的固定共享骨干网,然后通过反复利用该共享骨干网来降低广播时延,并且证明了所提算法的广播时延具有理论上限。

以上研究都是解决非睡眠应用场景下的低时延广播问题。针对异步睡眠无线传感网下的低时延广播问题,研究者们利用连通支配集的几何特性,提出了许多集中式和分布式广播算法^[5-8]。

(2) 协议干扰模型

上述广播算法都是基于简单的图干扰模型,即假设节点的干扰范围等于其传输范围。在协议干扰模型下,节点的干扰范围大于其传输范围,因而上述算法都不适合于解决协议干扰模型下的广播问题。

在协议干扰模型下,我们在前期所做的研究工作^[9-11]中分别针对异步睡眠无线传感网的单信道和多信道应用场景提出了低时延的广播算法,并通过理论分析和仿真实验验证了算法的正确性和有效性。

(3) 物理干扰模型

以上研究工作主要针对基于简单的图干扰模型或者协议干扰模型来设计广播算法,在实际应用中,物理干扰模型考虑信号干扰的累积效果,更能准确地刻画无线信号之间的干扰。因此,针对物理干扰模型下的低时延广播问题,研究者们提出了许多解决方案^[12-16]。

Yu 等人^[12]考虑如何将多个节点的广播报文以最低时延分发到整个网络,考虑的网络为无结构的无线网络,即没有冲突检测、采用异步通信、网络拓扑未知的无线网络,并且证明所提的广播算法能够以较高的概率在 $O((D+n_b)\log n + \log^2 n)$ 个时间片内完成,其中 D 表示网络直径, n_b 表示需要发送广播报文的节点数目, n 表示网络规模。文献^[13]针对异步睡眠场景提出了一种低时延的广播算法。

文献^[14]证明了物理干扰模型下带功率控制的

最低时延广播调度问题是 NP-难问题,并提出了一种低时延的近似算法。Xiao 等人^[15]也提出了一种多项式时间复杂度启发式广播算法,用以降低广播时延。Tian 等人^[16]首先基于最大独立集提出了一种物理干扰模型下的低时延广播算法 TEGB,时间复杂度为 $O(D\log n)$,并进一步减少冗余的广播次数,提出了一种改进的广播算法 TBGB,证明了其时间复杂度为 $O(D\Delta\log n)$,其中 Δ 表示网络的最大节点度。

然而,以上所提到的研究工作都没有利用相继干扰消除技术来设计低时延的广播算法。在无线传感网中,网络节点位置不同,相互之间的信号干扰也存在差异,如何合理地选择转发节点,增加可并发传输的链路数量非常具有挑战性。相继干扰消除技术能够有效地从相互干扰的信号中解码出所需要的信号,从而提高网络性能,但是尚无研究工作将相继干扰消除技术应用到广播算法中来以降低广播时延,因而非常有必要进行深入研究。

3 网络模型与问题定义

3.1 网络模型

本文考虑包含 n 个节点的无线传感网,每个传感器节点采用半双工的全向天线进行无线通信,并且最大传输距离相同。基于节点的无线通信特点,将该网络建模为一个单位圆图 $G=(V,E)$,集合 V 包含网络中所有节点,集合 E 包含网络中所有的边。两个节点之间存在一条边,当且仅当它们之间的距离小于或等于最大传输距离。

假设节点之间的时间已经同步,调度时间划分为若干个相同长度的时间片。每个节点可以在一个时间片内完成一份数据的发送或接收。本文采用物理干扰模型作为信号干扰模型,即当一个节点的信号干扰噪声比不低于某个特定阈值时,该节点才能正确解码出所需要的信号。

3.2 问题定义

本文研究无线传感网的广播问题,其中源节点在时间片 1 需要将它的数据传输给所有传感器节点。当所有传感器节点接收到源节点的数据时,广播任务才完成。广播调度用于对每个节点的传输时间片进行分配。本文的目标是确定如何最优化所有节点接收到源节点数据的时延并且保证调度的数据传输信号之间互不干扰。下面首先给出所研究问题的定义,然后分析该问题的难度。

定义 1. DEBPM (Delay Efficient Broadcast

problem under Physical Interference Model) 问题. 给定无线传感网 $G=(V, E)$ 和一个源节点 s , 在物理干扰模型下, 设计一种广播算法, 使得所有节点都能够接收到源节点的数据, 并且广播时延最低.

现有工作^[13]已证明, DEBPIM 问题是 NP-难问题, 无法设计出多项式时间的最优化算法. 为了不增加算法的时间复杂度, 同时尽可能地优化算法的性能, 需要设计多项式时间的低时延广播算法.

4 相继干扰消除基本理论

针对无线信号的干扰特性, 传统的算法通常采用干扰避免调度的思想来进行广播链路调度. 与传统干扰避免的方法不同的是, 本文考虑采用相继干扰消除技术来增加可并发传输的广播链路数量. 相继干扰消除是一种多包接收技术, 能够从冲突信号中解码出所需要的数据报文, 从而可有效减轻无线网络中的信号干扰. 在对具有相继干扰消除功能的接收节点迭代检测过程中, 最强的信号被解码, 而其他信号被认为是干扰^[19].

某一信号在接收节点满足 SIC 的条件是, 其信号干扰噪声比 (Signal to Interference and Noise Ratio, SINR) 不低于一个特定阈值. 此时, 可以对该信号进行解码并从混合信号中去除. 在随后的迭代检测中, 解码下一个最强的信号, 当所有的信号均被解码或者迭代失败时, 这个迭代过程结束.

在本文中, 定义噪声功率为 P_{N_0} , 满足相继干扰消除的特定阈值为 β_{SIC} , 两个节点 S_1 和 R_1 之间的距离为 $d_{S_1R_1}$. 当两条数据链路 $L_{S_1R_1}$ 和 $L_{S_2R_2}$ 同时进行传输时, 根据相继干扰消除技术的约束条件, 节点 R_1 能否解码出 S_1 的信号存在以下三种情况^[19].

(1) $L_{S_1R_1}$ 独立于 $L_{S_2R_2}$. $L_{S_1R_1}$ 与 $L_{S_2R_2}$ 同时传输, 节点 R_1 在 $L_{S_2R_2}$ 的干扰下仍可解码 $L_{S_1R_1}$ 的信号; 需要满足以下条件:

$$P_{R_1}(S_1)/(P_{R_1}(S_2)+P_{N_0}) \geq \beta_{SIC} \quad (1)$$

其中 $P_{R_1}(S_1)$ 和 $P_{R_1}(S_2)$ 表示节点 R_1 分别接收到两个发送节点 S_1 和 S_2 信号的强度. 不同的信号衰落模型可以得到不同的接收信号强度. 为了便于分析, 本文采用与文献[16]相同的信号衰落模型, 即可以按照以下公式计算得到 $P_{R_1}(S_1)$ 和 $P_{R_1}(S_2)$:

$$P_{R_1}(S_1) = P_{S_1} / d_{S_1R_1}^\alpha \quad (2)$$

$$P_{R_1}(S_2) = P_{S_2} / d_{S_2R_1}^\alpha \quad (3)$$

其中 P_{S_1} 和 P_{S_2} 分别表示节点 S_1 和 S_2 的信号发送功率, α 表示信号衰减指数, 取值范围为 2~6. 通过修

改式(2)和(3), 本文也可以将所提的算法扩展到其他的信号衰落模型.

如图 1 所示, 当节点 S_2 离节点 R_1 比节点 S_2 离节点 S_1 远时, 就可能满足以上条件.

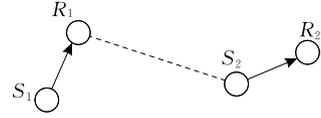


图 1 $L_{S_1R_1}$ 独立于 $L_{S_2R_2}$ 的示意图

(2) $L_{S_1R_1}$ 依赖于 $L_{S_2R_2}$. $L_{S_1R_1}$ 与 $L_{S_2R_2}$ 同时传输, 在节点 R_1 上, 节点 S_2 的信号更强, 满足相继干扰消除条件, 因而可将节点 S_1 的信号作为干扰信号, 先解码出节点 S_2 的信号, 然后移除该信号, 从而解码出节点 S_1 的信号. 需要满足以下条件:

$$P_{R_1}(S_2)/(P_{R_1}(S_1)+P_{N_0}) \geq \beta_{SIC} \quad (4)$$

如图 2 所示, 当节点 S_2 离节点 R_1 比节点 S_2 离节点 S_1 近时, 就可能满足以上条件.

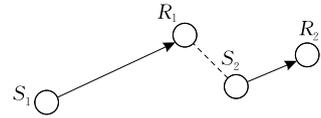


图 2 $L_{S_1R_1}$ 依赖于 $L_{S_2R_2}$ 的示意图

(3) $L_{S_2R_2}$ 干扰 $L_{S_1R_1}$. $L_{S_1R_1}$ 与 $L_{S_2R_2}$ 同时传输, 任何信号作为干扰信号都不满足相继干扰消除条件, 节点 R_1 无法解码出节点 S_1 的信号, 也就是同时满足以下两个条件:

$$P_{R_1}(S_1)/(P_{R_1}(S_2)+P_{N_0}) < \beta_{SIC} \quad (5)$$

$$P_{R_1}(S_2)/(P_{R_1}(S_1)+P_{N_0}) < \beta_{SIC} \quad (6)$$

如图 3 所示, 当节点 S_2 离节点 R_1 与节点 S_1 差不多时, 就可能满足以上条件.

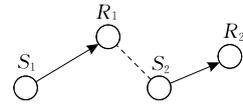


图 3 $L_{S_1R_1}$ 干扰 $L_{S_2R_2}$ 的示意图

针对前两种情况, 两条链路在同时进行数据传输时, 节点 R_1 仍然可以解码出节点 S_1 的信号, 而对第三种情况, 节点 R_1 无法解码出节点 S_1 的信号. 基于相继干扰消除技术的以上特点, 本文将针对性地设计不同的链路调度策略, 以期最大程度地增加可并发传输的数据链路数量, 从而降低广播时延.

5 贪婪广播算法

虽然贪婪广播算法在最坏情况下的理论时延通

常比较高,但是往往在实验中获得较好的平均时延.因此,本文首先考虑在本节设计一种贪婪广播算法 GreedyB,然后以此算法为基础,在下一节结合相继干扰消除技术设计另一种低时延的广播算法. GreedyB 算法的伪代码如算法 1 所示.

算法 1. GreedyB.

输入: 网络规模、源节点、节点的位置、最大传输距离、信号传输功率、SIC 特定阈值、噪声功率、信号衰减指数

输出: 所有节点的传输时间片和广播时延

1. 以源节点为根节点构造宽度优先搜索树将所有节点划分到不同的层中,包括 $L_0, L_1, L_2, \dots, L_K$, 其中 K 表示宽度优先搜索树的高度;
2. 依据覆盖节点数目最多优先作为父节点的规则从最顶层 L_0 开始逐层构造广播树 T_B ;
3. 调度时间片 $t_s \leftarrow 1$;
4. 已调度传输时间片的节点集合 $U \leftarrow \emptyset$;
5. FOR $i \leftarrow 0$ to $K-1$ DO
6. FOR $j \leftarrow 1$ to $length(L_i)$ DO
7. 取出 L_i 中的第 j 个节点 $L_i(j)$;
8. IF 节点 $L_i(j)$ 的子节点集合不为空集 THEN
9. $k \leftarrow t_s$;
10. WHILE 节点 $L_i(j)$ 与 $U(k)$ 中的节点存在信号干扰 DO
11. $k \leftarrow k+1$;
12. END
13. 调度节点 $L_i(j)$ 的传输时间片为 k ;
14. $U(k) \leftarrow U(k) \cup \{L_i(j)\}$;
15. END
16. END
17. $t_s \leftarrow |U| + 1$;
18. END
19. 广播时延 $\leftarrow t_s$;
20. RETURN 所有节点的传输时间片和广播时延

GreedyB 算法采用逐层调度的方法进行广播调度,因而第一步就是以源节点为根节点构造宽度优先搜索树,并将所有节点划分到不同的层中.为了提高广播算法的性能,有效地避免信号干扰,必须确定父子节点关系.因为无线信号具有广播特性,所以为了减少广播转发节点的数目,我们依据覆盖节点数目最多优先作为父节点的规则从最顶层开始逐层构造广播树 T_B .

构造好广播树后,从最顶层开始进行逐层广播调度,即上一层节点广播数据传输完毕后,下一层节点再进行广播数据传输.在每一层中,按顺序取出存在子节点的每个节点,然后对该节点的传输时间片

进行分配.时间片分配方法是,从本层的起始调度时间片 t_s 开始,分析该节点是否与当前时间片已调度的节点存在信号干扰.存在信号干扰的判断依据是:假设该节点能与当前时间片已调度的节点同时进行广播数据传输,分析这些节点的接收节点,如果存在某个接收节点的 SINR 小于特定阈值 β_{SIC} ,则认为假设不成立,即该节点与当前时间片已调度的节点之间存在信号干扰.

因为 GreedyB 算法未应用相继干扰消除技术,所以只要出现上面的情况,就认为两条链路相互干扰.该算法采取的策略是,进行干扰避免调度,即将相互干扰的链路划分到不同的时间片上进行数据传输.算法 1 中的 $U(k)$ 表示传输时间片分配在 k 时间片的所有节点集合, k 为正整数,而 $|U|$ 表示集合 U 中包含的非空元素 $U(k)$ 的数目,同时也表示所有已调度节点的最大传输时间片.

下面通过一个例子来介绍 GreedyB 算法的主要思想.如图 4 所示,假设网络中存在 10 个节点,包括 1 个汇聚节点 s 和 9 个传感器节点.首先,根据宽度优先搜索树将所有节点划分到 4 层中.图中的实线表示两个节点在通信范围内.其次,依据覆盖节点数目最多优先作为父节点的规则构造广播树,例如, L_1 层中节点 v_2 覆盖的节点数目最多,因而被选作 L_2 层所有节点的父节点,最终构造的广播树如图 5 所示.

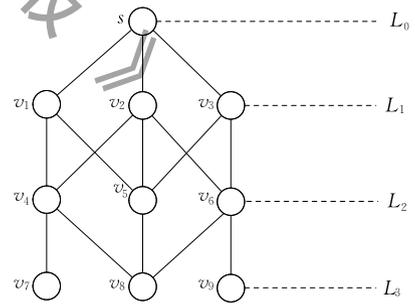


图 4 网络节点分层

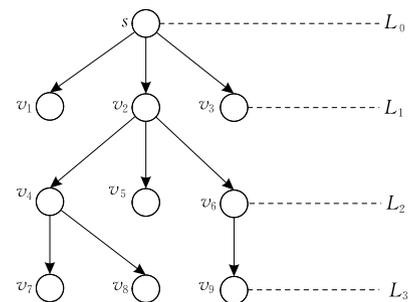


图 5 广播树

GreedyB 算法下一步进行广播链路调度, 采取的方法是干扰避免调度. L_0 和 L_1 层中的调度比较简单, 原因是只有一个发送节点. L_2 层中, 节点 v_4 调度好传输时间片后, 需要分配节点 v_6 的传输时间片. 如图 6 所示. 分析判断节点 v_6 与 v_4 的信号会不会对各自的接收节点造成影响, 也就是其接收节点的 SINR 会不会低于特定阈值. 如果不影响, 则节点 v_6 和 v_4 可以安排在同一时间片传输, 否则节点 v_6 将安排在下一时间片传输, 以避免信号干扰.

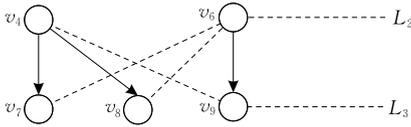


图 6 广播链路调度

6 基于相继干扰消除的广播算法

值得注意的是, GreedyB 算法在进行广播链路调度时, 采取的方法是干扰避免调度的思想. 而结合相继干扰消除技术能够在一定程度上增加可并发传输的广播链路数量, 因此, 本节基于相继干扰消除技术和贪婪广播算法设计另一种低时延的广播算法 SICB, 以期进一步降低广播时延.

SICB 算法与 GreedyB 算法的步骤基本相同, 主要区别在于, 判断广播链路是否干扰的依据不同, 即伪代码中的第 10 行不同. 两条广播链路 $L_{S_1R_1}$ 和 $L_{S_2R_2}$ 相互不干扰, GreedyB 算法的判断依据如下:

$$(L_{S_1R_1} \text{ 独立于 } L_{S_2R_2}) \cap (L_{S_2R_2} \text{ 独立于 } L_{S_1R_1}) \quad (7)$$

式(7)要求两条链路的接收节点的 SINR 都要高于特定的阈值. 而 SICB 算法的判断依据是 SIC 条件下两条链路存在干扰, 即满足:

$$\neg (L_{S_1R_1} \text{ 干扰 } L_{S_2R_2}) \cap \neg (L_{S_2R_2} \text{ 干扰 } L_{S_1R_1}) \quad (8)$$

与 GreedyB 算法不同, 当 $L_{S_1R_1}$ 独立于 $L_{S_2R_2}$ 或 $L_{S_1R_1}$ 依赖于 $L_{S_2R_2}$ 时, SICB 算法都认为是 $L_{S_1R_1}$ 不干扰 $L_{S_2R_2}$, 因而放宽了干扰限制的条件, 增加了可并发传输的广播链路数量, 有利于降低广播时延.

在图 6 所示广播链路调度的例子中, 如果存在图 7 中所示的情况, 因为节点 v_6 离节点 v_8 比较近, 所以 GreedyB 算法分析出节点 v_6 会干扰节点 v_8 接收节点 v_4 的信号, 从而两个发送节点无法同时进行

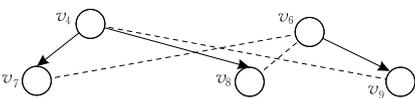


图 7 基于 SIC 的广播链路调度

数据传输, 需要进行干扰避免调度. 但是结合相继干扰消除技术后, SICB 算法分析出接收节点 v_8 可以先解码出 v_6 节点的信号, 然后移除该信号, 从而获得节点 v_4 的信号, 因而两个发送节点同时进行的数据传输不会影响接收节点正常接收数据.

因为在 SICB 算法的实际应用中, 可能存在多条广播链路, 所以需要分析多条广播链路的累积干扰影响, 也就是式(1)和式(4)的分母中需要考虑多个干扰信号的影响.

7 算法性能理论分析

7.1 正确性分析

定理 1. GreedyB 算法提供了一种正确的广播调度方案.

证明. 考虑整个无线传感网为连通的网络. GreedyB 算法首先对所有节点进行分层, 然后构造广播树, 最后采用逐层调度和干扰避免调度的方法分配每个发送节点的传输时间片. 因为广播树覆盖了整个网络中的所有节点, 所以每个节点都有父节点, 也就是说, 广播数据能够从源节点传输给网络中的所有节点. 下面分析广播树中的转发节点在传输数据之前是否已调度其父节点将数据广播给该节点. 此外, 分析调度的广播链路之间是否会由于信号干扰而影响数据的正确接收.

根据广播树的构造规则, 一个转发节点的父节点处于该节点的上一层. 因为每一层调度结束后, 调度时间片会设置为已调度的最大传输时间片加 1, 所以转发节点的传输时间片肯定会小于上一层中任何一个节点的传输时间片.

GreedyB 算法采取的干扰避免调度的思想来分配广播链路的传输时间片, 即在两条广播链路相互之间存在干扰时, 将两条广播链路分配到不同的时间片上进行传输, 因此, 调度的广播链路之间不会由于信号干扰而影响数据的正确接收. 证毕.

定理 2. SICB 算法提供了一种正确的广播调度方案.

证明. SICB 算法的步骤与 GreedyB 算法的步骤类似, 唯一的区别在于判断链路是否干扰的依据不同. 根据相继干扰消除的基本思想, 两条链路存在依赖关系时, 接收节点也能正确解码出所需要的数据信号. 因此, SICB 算法调度的广播链路也能实现数据的正确接收, 从而本定理成立. 证毕.

7.2 时间复杂度分析

定理 3. GreedyB 算法的时间复杂度为 $O(Kn^3)$.

证明. SICB 算法的第一步是构造宽度优先搜索树对所有节点进行分层, 需要遍历每个节点, 时间开销为 $O(n)$; 第二步是构造广播树, 即确定节点之间的父子关系, 覆盖节点数目最多的规则需要分析每个节点的邻居节点, 因而时间开销为 $O(n^2)$; 最后一步是逐层进行广播调度, 在每一层进行广播调度时, 需要考虑不同广播链路之间是否存在干扰关系, 因而每一层广播调度的时间开销为 $O(n^3)$. 因为总层数为 K , 所以最后一步需要 $O(Kn^3)$ 时间. 因此, 将所有步骤的时间开销综合后可以得到本定理成立. 证毕.

定理 4. SICB 算法的时间复杂度为 $O(Kn^3)$.

证明. SICB 算法与 GreedyB 算法的步骤基本相同, 主要区别在于判断干扰的依据不同, 因而通过类似于定理 4 的证明, 可以得到 SICB 算法的时间复杂度也为 $O(Kn^3)$. 证毕.

7.3 空间复杂度分析

定理 5. GreedyB 算法的空间复杂度为 $O(n)$.

证明. 分析 GreedyB 算法每个步骤在运行过程中临时占用存储空间的大小. 第一步是构造宽度优先搜索树并对节点进行分层, 运行过程中需要存储节点的邻居节点信息, 因为节点最多存在 Δ 个邻居节点, 所以该步骤的空间复杂度为 $O(\Delta)$. 第二步是构造广播树, 运行过程中也需要存储节点的邻居节点信息, 因而空间复杂度为 $O(\Delta)$. 最后一步是按照广播树进行广播调度, 运行过程中需要存储已调度的广播链路信息, 空间复杂度为 $O(n)$. 综合所有步骤的空间复杂度后, 可以得到 GreedyB 算法的空间复杂度为 $O(n)$. 证毕.

定理 6. SICB 算法的空间复杂度为 $O(n)$.

证明. SICB 算法与 GreedyB 算法的步骤基本相同, 主要区别在于判断干扰的依据不同, 判断过程中不需要额外的存储空间, 因而通过类似于定理 5 的证明, 可以得到本定理成立. 证毕.

8 仿真实验性能分析

本节通过仿真实验来评估所提算法 GreedyB 和 SICB 的性能. 此外, 现有算法多数采用连通支配集的思想来实现^[13-16], 因而为了与现有算法进行比较, 本文还实现了基于连通支配集的广播算法, 称为

CDSB(Connected Dominating Set-based Broadcast). CDSB 算法利用连通支配集来构造广播树, 然后基于广播树采用干扰避免的思想进行逐层广播调度. 仿真实验采用 NS2(Network Simulator 2) 平台来实现. 实验测试两种算法的性能受网络参数变化的影响.

8.1 实验参数设置

本文的实验考虑长和宽都为 80 m 的矩形区域. 所有传感器节点随机部署于该区域. 实验在 20 个随机生成的网络拓扑上进行. 此外, 针对每个拓扑进行 10 次实验, 并且在每次实验时随机选择一个节点作为源节点. 其中 MAC(Medium Access Control) 协议为介质访问协议, 采用的是 TDMA(Time Division Multiple Access) 协议. 实验测试算法的广播时延, 即所有传感器节点收到源节点数据所需要的总的时间片数目, 其单位为时间片. 最终实验结果为所有测试值的平均值.

实验中主要的参数包括: 网络规模、最大传输距离、特定阈值、信号传输功率、噪声功率和信号衰减指数. 在实际情况下各参数会在不同范围内变化, 因而我们需要通过仿真实验分析各个参数对算法性能的影响. 实验参数设置情况如表 1 所示, 特定阈值的单位为常数.

表 1 实验参数设置

实验参数	取值范围
区域范围	80 m × 80 m
信号传播模型	Two-way Ground
MAC 协议	TDMA
网络规模	50 ~ 350
最大传输距离	10 ~ 45 m
特定阈值	1 ~ 5.2
信号传输功率	1000 ~ 5200 W
噪声功率	1 ~ 29 W
信号衰减指数	2 ~ 4.8

在研究某一参数对算法性能影响时, 采用控制变量法, 即改变需要研究的参数, 使变量在所设置的表 1 的范围内变化, 从而进行相关的仿真实验, 获得相关的实验结果作为最终的实验数据.

8.2 网络规模对算法性能的影响

本节测试网络规模对算法性能的影响. 固定参数如下: 最大传输距离为 30 m, 特定阈值为 1.5, 信号传输功率为 1350 W, 噪声功率为 1 W, 信号衰减指数为 2. 网络规模从 50 增加到 330. 通过仿真实验可以得到网络规模对 CDSB、GreedyB 和 SICB 三种算法性能的影响, 实验结果如图 8 所示.

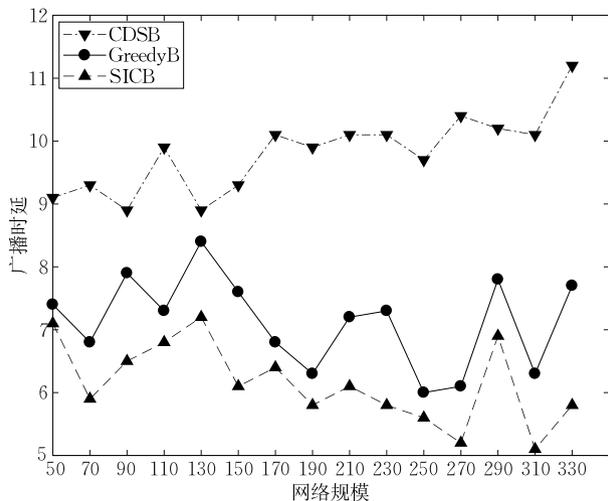


图 8 网络规模对算法性能的影响

由图 8 可知, GreedyB 和 SICB 两种算法的广播时延随着网络规模的变化都具有一定的波动性. 虽然网络规模增大后, 源节点需要将数据广播给更多的节点, 但是一个节点可以覆盖的节点数目也随之增多, 根据无线信号的广播特性, 节点只需要一次广播就能将数据传输给覆盖范围内的节点. 本文所提两种算法都是依据覆盖节点数目最多优先作为父节点的规则来构造广播树, 因此, 广播时延没有明显的逐渐增加或减少的变化趋势. 此外, CDSB 算法的性能随着网络规模的增大而呈上升趋势, 主要原因是: 采用连通支配集来构造广播树将导致广播转发节点数目的增多, 广播链路存在干扰的概率增大, 从而减少了可并发传输的广播链路数量.

从图 8 还可观察到, GreedyB 和 SICB 两种算法的性能始终优于 CDSB 算法, 并且 SICB 算法的性能最好. 相比于 CDSB 算法, GreedyB 和 SICB 两种算法的性能优化率最高分别可达 38.5% 和 50% (网络规模为 270 时).

8.3 最大传输距离对算法性能的影响

本节测试最大传输距离对算法性能的影响, 固定参数如下: 网络规模为 100, 特定阈值为 1.5, 噪声功率为 1 W, 信号衰减指数为 2. 最大传输距离从 10 m 增加到 45 m. 根据物理干扰模型的定义, 信号传输功率会随着最大传输距离的增加而增大, 从 150 W 增大到 3037.5 W. 通过仿真得到的实验结果如图 9 所示.

由图 9 可知, 三种算法的广播时延基本上都随着最大传输距离的增大而减少. 最大传输距离逐渐增大, 引起网络层级的减少, 从而所需的时延也不断减少. 从图中还能看出, 无论最大传输距离如何变

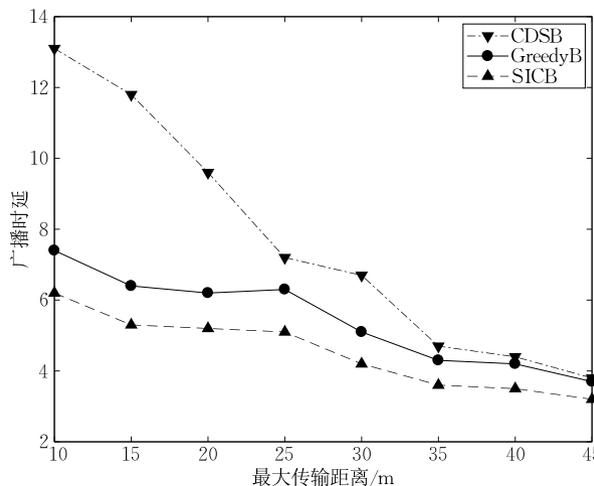


图 9 最大传输距离对算法性能的影响

化, SICB 和 GreedyB 两种算法的性能始终都要优于 CDSB 算法, 并且最大传输距离比较小的时候性能优势显著. 主要原因是: 最大传输距离越小, 广播树越高, CDSB 算法采用连通支配集来构造广播树, 每一层需要较多的转发节点, 从而每一层的广播时延会由于信号干扰而增大, 导致最终广播时延的增大. 本文所提两种算法相比于 CDSB 算法的性能优化率最高分别可达 43.5% 和 52.7% (最大传输距离为 10 m 时).

8.4 特定阈值对算法性能的影响

本节测试特定阈值的变化对三种算法性能的影响, 固定参数如下: 网络规模为 100, 噪声功率为 1 W, 信号衰减指数为 2, 最大传输距离为 30 m. 特定阈值从 1 增加到 5.2, 信号传输功率从 900 W 增加到 4680 W. 仿真实验最终结果如图 10 所示.

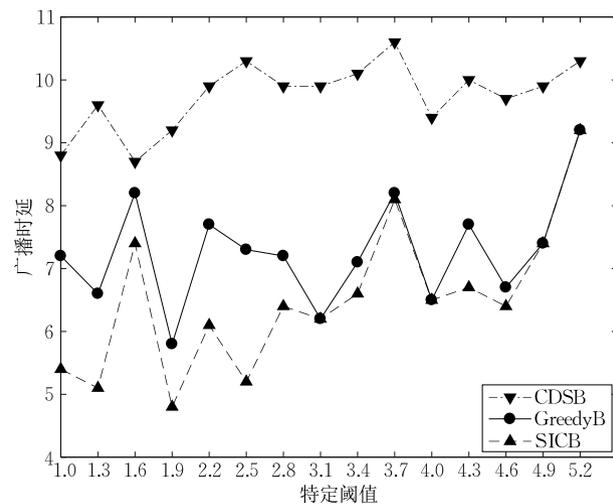


图 10 特定阈值对算法性能的影响

由图 10 可知, 三种算法的广播时延与特定阈值的大小关系密切, 是否能解码信号的标准是由特定

阈值大小所决定的。当不断增大特定阈值时,解码干扰信号的条件变得越来越苛刻,从而三种算法的广播时延呈一定的上升趋势。随着特定阈值的增大,由于无法有效地解码干扰信号,与 GreedyB 算法相比, SICB 算法的优越性逐渐减弱。此外,本文所提两种算法的性能始终优于 CDSB 算法,性能优化率最高分别可达 37% 和 47.8% (特定阈值为 1.9 时)。

8.5 信号传输功率对算法性能的影响

本节测试信号传输功率对算法性能的影响,固定参数如下:网络规模为 100,阈值为 1.5,噪声功率为 1 W,信号衰减指数为 2。信号传输功率从 1000 W 增加到 5200 W。最大传输距离相应地从 25.8 m 增加到 58.9 m。通过仿真实验得到的实验结果如图 11 所示。

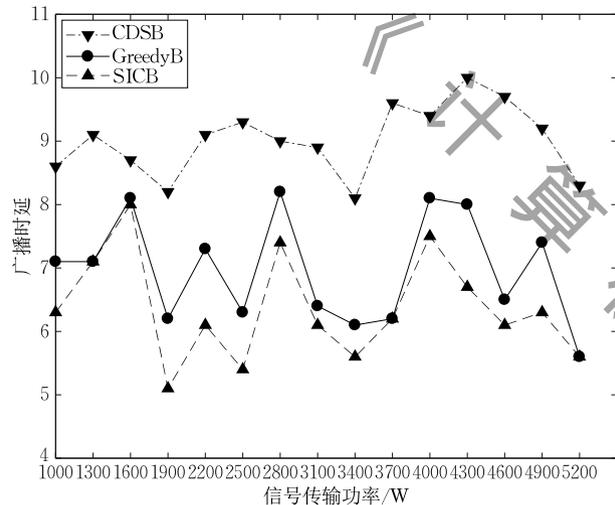


图 11 信号传输功率对算法性能的影响

由图 11 可知,随着信号传输功率的增大,三种算法的广播时延都具有一定的波动性。由物理干扰模型的正确收包条件可知,信号传输功率的增大,将引起接收节点信号接收功率的提升,也会导致节点的干扰功率增大,由于两者都作为影响节点收包的重要因素,接收节点的 SINR 变化不大,因而三种算法广播时延的变化趋势都会有一定的不稳定性。此外,在本节的所有实验中, GreedyB 和 SICB 两种算法的性能始终要优于 CDSB 算法,性能优化率最高分别可达 35.4% (信号传输功率为 3700 W 时) 和 37.8% (信号传输功率为 1900 W 时)。

8.6 噪声功率对算法性能的影响

本节测试模拟噪声功率对算法性能的影响。固定参数如下:网络规模为 100,最大传输距离为 10 m,特定阈值为 1.5,信号衰减指数为 2。噪声功率从 1 W 增加到 29 W,信号传输功率从 150 W 增加到

4350 W。通过仿真实验得到噪声功率对算法性能的影响,实验结果如图 12 所示。

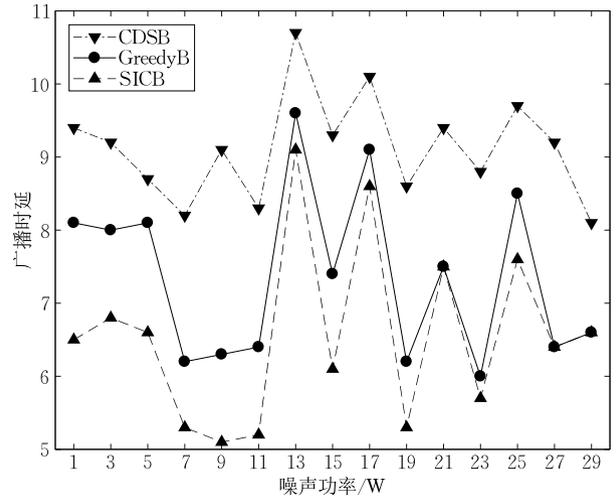


图 12 噪声功率对算法性能的影响

由图 12 可知,随着噪声功率的增加,三种算法的性能都具有一定的波动性。由物理干扰模型的正确收包条件可知,噪声功率和信号传输功率同时增加,在特定阈值不变的条件下,能够并发传输的数据链路数目不多,因而广播时延变化趋势不明显。此外,本文所提两种算法的性能始终优于 CDSB 算法,性能优化率最高分别可达 31.8% (噪声功率为 23 W 时) 和 44% (噪声功率为 9 W 时)。

8.7 信号衰减指数对算法性能的影响

本节测试信号衰减指数对算法性能的影响。固定参数如下:网络规模为 100,最大传输距离为 10 m,特定阈值为 1.5,噪声功率为 1 W。信号衰减指数从 2 增加到 4.8,信号传输功率从 150 W 增加到 94643.6 W。信号衰减指数的变化对两种算法的性能影响实验结果如图 13 所示。

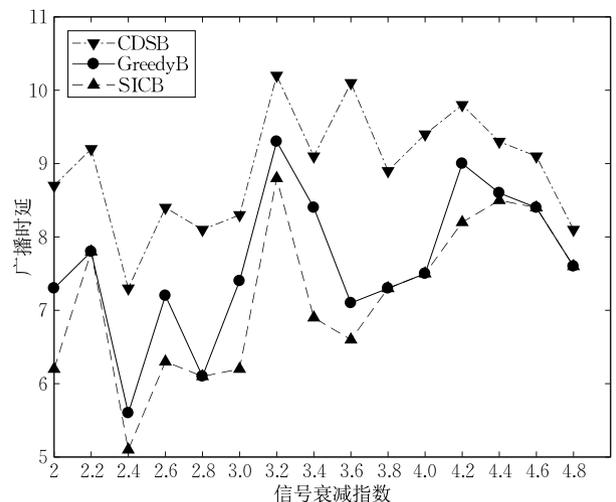


图 13 信号衰减指数对算法性能的影响

由图 13 可观察到,随着信号衰减指数的变化,三种算法的性能变化趋势都具有一定的波动性.主要原因是,信号衰减指数不断增大,然而最大传输距离不变,由于广播树的层级主要受最大传输距离的影响,因而变化不大,从而按照广播树进行逐层广播调度的时延变化不大.

此外,在本节的仿真实验中,当信号衰减指数为 3.6 时,相比于 CDSB 算法, SICB 和 GreedyB 两种算法的性能优化率最高,分别可达 29.7% 和 34.7%. 当信号衰减指数大于 3.6 时, SICB 算法相比于 GreedyB 算法的优势明显减弱.

9 讨 论

相比于简单的图模型和协议干扰模型,本文采用的物理干扰模型能够更加准确地刻画无线信号之间的干扰,基于该模型设计的广播算法更能有效地降低广播时延.简单的图模型相当于一种特殊的协议干扰模型,因此为不失一般性,主要对比分析协议干扰模型和物理干扰模型.下面通过一个例子来分析.

如图 14 所示,根据协议干扰模型的定义,一个节点 S_2 的干扰范围和传输范围都是以该节点为圆心的圆,并且其干扰范围要大于传输范围.只有处于该节点传输范围内的节点(例如节点 R_2)才能正确接收到其传输的数据.此外,当两个节点 S_1 和 S_2 同时进行数据传输时,处于节点 S_2 干扰范围内的节点 R_1 无法正确接收节点 S_1 传输的数据.因此,基于协议干扰模型设计的广播算法需要对图 14 中的两条链路 $L_{S_1R_1}$ 和 $L_{S_2R_2}$ 进行干扰避免调度.而根据物理干扰模型的要求,当节点 S_1 的信号足够强,使得节点 R_1 的 SINR 大于特定阈值 β_{SIC} 时,节点 R_1 仍然能够正确解码出 S_1 的信号,从而两条链路 $L_{S_1R_1}$ 和 $L_{S_2R_2}$ 可以同时进行数据传输,从而有利于降低广播链路传输时延.

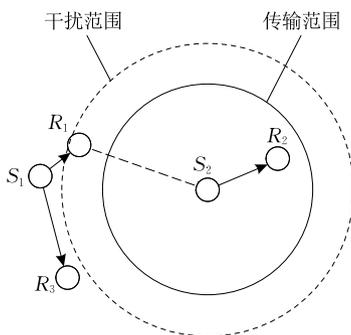


图 14 用于协议干扰模型与物理干扰模型对比分析的示例

值得一提的是,根据协议干扰模型的要求,当节点 R_3 处于节点 S_2 干扰范围外并且节点 R_2 处于节点 S_1 干扰范围外时,两条链路 $L_{S_1R_3}$ 和 $L_{S_2R_2}$ 可以同时进行数据传输.但是,如图 14 所示,节点 R_3 的 SINR 很有可能小于特定阈值 β_{SIC} ,因此,基于协议干扰模型设计的广播算法很可能导致链路 $L_{S_1R_3}$ 数据传输失败而需要重传,不利于降低广播时延.

本文假设源节点能够收集全网信息,在网络状态稳定后调用广播算法来为传感器节点分配广播传输时间片.当网络规模发生变化时,可能存在新节点加入网络,或者节点由于能量耗尽或者被破坏而退出网络,下面分析节点加入或退出可能对广播时延造成的影响.如果新加入的节点处于广播树上转发节点的覆盖范围,或者退出的节点不是转发节点,则源节点还可以继续采用本文所提的算法来进行广播时间片分配,从而保证广播的正确性和有效性,并且不影响网络的广播时延;否则,源节点需要重新收集全网信息,然后再调用广播算法来构造广播树并进行广播时间片的分配,从而会增加网络广播时延.

10 结 论

本文针对无线传感网的低时延广播问题,分别提出了一种贪婪广播算法 GreedyB 和一种基于相继干扰消除的低时延广播算法 SICB. GreedyB 算法通过构造宽度优先搜索树对网络节点进行分层,依据覆盖节点数目最多优先选为父节点的规则构造广播树,并采用逐层调度和干扰避免调度的方法进行广播链路调度. SICB 算法以 GreedyB 算法为基础,结合相继干扰消除技术来设计链路调度策略,增加了可并发传输的广播链路数量,有效地降低了广播时延.理论分析证明了两种算法的正确性、时间复杂度和空间复杂度.仿真结果表明, GreedyB 和 SICB 两种算法的性能要优于现有算法,并且 SICB 算法的性能优化率高于 GreedyB 算法.在未来的工作中,我们将进一步考虑网络节点可移动的场景下,如何设计低时延的广播算法.

参 考 文 献

- [1] Fei Huan, Xiao Fu, Li Guang-Hui, et al. An anomaly detection method of wireless sensor network based on multi-modals data stream. Chinese Journal of Computers, 2017, 40(8): 1829-1842(in Chinese)

- (费欢, 肖甫, 李光辉等. 基于多模态数据流的无线传感器网络异常检测方法. 计算机学报, 2017, 40(8): 1829-1842)
- [2] Bi Ran, Li Jian-Zhong, Gao Hong. Approximate monitoring algorithm for minimizing communication cost in wireless sensor networks. *Chinese Journal of Computers*, 2015, 38(10): 2092-2105(in Chinese)
(毕冉, 李建中, 高宏. 无线传感器网络中最小化通信开销的近似监测算法. 计算机学报, 2015, 38(10): 2092-2105)
- [3] Gandhi R, Parthasarathy S, Mishra A. Minimizing broadcast latency and redundancy in ad hoc networks//*Proceedings of the ACM MobiHoc*. Maryland, USA, 2003: 222-232
- [4] Huang C H, Wu H C, Iyengar S S. Multisource broadcast in wireless networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2012, 23(10): 1908-1914
- [5] Jiao X, Lou W, Ma J, et al. Minimum latency broadcast scheduling in duty-cycled multi-hop wireless networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2012, 23(1): 110-117
- [6] Le D T, Zalyubovskiy V V, et al. LABS: Latency aware broadcast scheduling in uncoordinated duty-cycled wireless sensor networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2014, 74(11): 3141-3152
- [7] Zhao D, Chin K W, Raad R. Approximation algorithms for broadcasting in duty cycled wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 2014, 20(8): 2219-2236
- [8] Duc T L, Le D T, Dung T N, et al. A distributed scheme for broadcast scheduling in duty-cycled wireless sensor networks//*Proceedings of the 10th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication*. Danang, Viet Nam, 2016: 1-6
- [9] Jiao X, Wang X, Lou W, et al. On minimizing interference-free broadcast latency in duty-cycled wireless sensor networks. *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, 2013, 18(3-4): 293-309
- [10] Jiao X, Lou W, Wang X, et al. On interference-aware gossiping in uncoordinated duty-cycled multi-hop wireless networks. *Elsevier Ad Hoc Networks Journal*, 2013, 11(4): 1319-1330
- [11] Jiao X, Xiao W, Ge B, et al. On minimum-latency broadcast in multichannel duty-cycled wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015, 2015(3-4): 17-24
- [12] Yu D, Hua Q, Wang Y, et al. Efficient distributed multiple-message broadcasting in unstructured wireless networks//*Proceedings of the IEEE INFOCOM*. Turin, Italy, 2013: 2427-2435
- [13] Wang L, Banks B, Yang K. Minimum-latency broadcast schedule in duty-cycled multihop wireless networks subject to physical interference//*Proceedings of the IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc & Sensor Networks*. Hawaii, USA, 2014: 8-15
- [14] Nhat L, Min K, Dung T, et al. Broadcast scheduling problem in SINR model. *International Journal of Foundations of Computer Science*, 2014, 25(3): 331-342
- [15] Xiao S, Pei J, Chen X, et al. Minimum latency broadcast in the SINR model: A parallel routing and scheduling approach. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(6): 1027-1030
- [16] Tian X, Yu J, Ma L, et al. Distributed deterministic broadcasting algorithms under the SINR model//*Proceedings of the IEEE INFOCOM*. San Francisco, USA, 2016: 1-9
- [17] Gupta P, Kumar P R. The capacity of wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(2): 388-404
- [18] Lv Shao-He, Wang Xiao-Dong, Zhou Xing-Ming. Analysis of scheduling performance in wireless networks with successive interference cancellation. *Journal of Software*, 2012, 23(5): 1233-1247(in Chinese)
(吕绍和, 王晓东, 周兴铭. 相继干扰消除的无线网络中的调度性能分析. 软件学报, 2012, 23(5): 1233-1247)
- [19] Lv Shao-He, Wang Xiao-Dong, Zhou Xing-Ming. Scheduling schemes in wireless networks with successive interference cancellation. *Journal of Software*, 2012, 23(4): 941-951(in Chinese)
(吕绍和, 王晓东, 周兴铭. 相继干扰消除的无线网络中的调度算法. 软件学报, 2012, 23(4): 941-951)
- [20] Lin H, Ishibashi K, Shin W Y, et al. Decentralized power allocation for secondary random access in cognitive radio networks with successive interference cancellation//*Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*. Kuala Lumpur, Malaysia, 2016: 1-6
- [21] Jiang D, Cui Y. Network coding-based caching in large-scale SIC-enabled wireless networks//*Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*. Paris, France, 2017: 1-7
- [22] Sheng M, Li X, Wang X, et al. Topology control with successive interference cancellation in cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(1): 37-48
- [23] Yang C, Wang X, Xia B, et al. Joint interference cancellation in cache- and SIC-enabled networks//*Proceedings of the IEEE GLOBECOM*. Singapore, 2017: 1-6
- [24] Li L, Alimi R, Shen D, et al. A general algorithm for interference alignment and cancellation in wireless networks //*Proceedings of the IEEE INFOCOM*. San Diego, USA, 2010: 1-9



JIAO Xian-Long, Ph. D. , lecturer. His research interests include wireless sensor networks, artificial intelligence and information security.

WANG Gang, Ph. D. , professor. His research interests include complex networks, information security, wireless sensor networks, etc.

TIAN Hai-Chen, bachelor. His research interest is wireless sensor networks.

DONG Zhou, bachelor. His research interest is wireless sensor networks.

FENG Xin-Xi, Ph. D. , professor, Ph. D. supervisor. His research interests include wireless sensor networks, artificial intelligence, etc.

CHEN Gui-Rong, Ph. D. , lecturer. Her research interests include wireless sensor networks, artificial intelligence, data mining, information security, etc.

Background

Wireless sensor networks have been widely applied in many areas, such as battlefield surveillance, intelligent transportation, precision agriculture, structural health monitoring, disaster recovery and environmental monitoring. Broadcast is an important operation in wireless sensor networks. In many delay-sensitive fields, the data is required to be broadcast to the sensor nodes with low delay, and thus it is critical to design low-delay broadcast algorithms. Existing work has proved that, the minimum-delay broadcast problem under the constraint of signal interference is NP-hard. Previous researches use interference avoidance scheduling methods to design low-delay broadcast algorithms. Although these algorithms can effectively mitigate the interference between signals, these algorithms reduce the number of broadcast links that can be transmitted concurrently, which is not conducive to reducing broadcast delay.

In this paper, to increase the number of broadcast links that can be transmitted concurrently, we study how to apply successive interference cancellation technology to design a low-delay broadcast algorithm. First, we propose a greedy broadcast algorithm called GreedyB according to the rule that the nodes who cover the most nodes will be first chosen as the parent nodes. GreedyB algorithm uses the layer-by-layer scheduling and interference avoidance scheduling methods to

schedule the broadcast links, which effectively solve the problem of signal interference, but the number of concurrent transmission broadcast links is limited. Then, based on GreedyB algorithm, we present another broadcast algorithm called SICB by combining with successive interference cancellation technology. SICB algorithm makes full use of the benefits of successive interference cancellation to schedule broadcast links, relaxes the limitation of link interference and increases the number of broadcast links that can be transmitted concurrently. The correctness, time complexity and spatial complexity of these two algorithms are analyzed. The results of performance evaluation demonstrate that, GreedyB and SICB algorithms achieve lower delay than the existing algorithm.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No. 61573017 and No. 61402510 and the China Postdoctoral Science Foundation under Grant No. 2014M553686. Our group has been working on the research of broadcast algorithms in wireless sensor networks for many years, and has achieved some results on broadcast scheduling algorithms. We have published some high quality papers in important conferences and journals, such as ICDCS, *TPDS*, *Ad Hoc Networks*, *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, etc.