

文章编号: 1674-8085(2019)02-0045-07

基于随机博弈机制的物联网安全收敛算法研究

*廖慧惠¹, 杜秀全²

(1. 安徽工业经济职业技术学院电气工程学院, 安徽, 合肥 230051; 2. 安徽大学计算机科学与技术学院, 安徽, 合肥 230039)

摘 要: 为解决当前物联网安全收敛算法存在的节点覆盖区域冲突, 读写性能不强, 难以解决信号干涉等不足, 本文提出了基于随机博弈机制的物联网安全收敛算法。首先, 采取信号正交调节方式, 确定信道发射过程中最佳信噪比性能, 且通过随机博弈方式进一步调节节点覆盖半径, 降低因节点间频率干涉而导致的覆盖区域冲突及读写性能不强等问题, 改善了节点间因工作频段相似而导致频率干涉问题; 随后, 考虑到单纯通过调节节点覆盖半径方式存在的精确化程度不够的问题, 采取调整节点发射过程中时间戳读写的措施, 构建时间戳读写规避机制, 通过调整物联网节点进行信道发射过程中的时间窗口, 实现对发射信号的精确传送, 进一步降低了信号干涉发射的概率。仿真实验表明: 与当前广泛部署的节点能量感知退避算法(Node Energy Aware Backoff Algorithm, NEAB 机制), 时间窗口感知调整算法(Time Window Aware Adjustment Algorithm, TW2A 机制)相比, 本文收敛算法具有更小的网络完全收敛时间与节点读写时间, 以及更少的单节点最大收敛次数, 具有很强的实际部署价值。

关键词: 物联网; 信道规避; 最佳信噪比; 信号干涉; 时间戳

中图分类号: TP393.04

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2019.02.009

RESEARCH ON SECURITY CONVERGENCE ALGORITHM OF INTERNET OF THINGS BASED ON RANDOM GAME MECHANISM

*LIAO Hui-hui¹, DU Xiu-quan²

(1. School of Electrical Engineering, Anhui Technical College of Industry and Economy, Anhui, Hefei 230051, China;

2. School of Computer Science and Technology, Anhui University, Anhui, Hefei 230039, China)

Abstract: In order to solve the current security convergence algorithm of Internet of Things (IOT) problems such as node coverage area conflict, poor read-write performance, difficult to accurately adjust and solve the signal interference, this paper proposes a stochastic game-based security convergence algorithm for IOT. Firstly, signal orthogonal adjustment is adopted to determine the optimal SNR performance in the process of channel transmission, and the coverage radius of nodes is further adjusted by stochastic game method, which significantly reduces the coverage area conflict and poor read-write performance caused by frequency interference between nodes, and improves the similarity of working frequency bands between nodes. Then, considering the inadequate accuracy of the method of simply adjusting the node coverage radius, we take measures to adjust the timestamp reading and writing in the process of node launching, construct a timestamp reading and writing avoidance mechanism, and adjust the time window of the nodes of IOT in the process of channel launching. The accurate condition of launching process is realized, and the probability of signal interference emission is further reduced. Simulation results show that compared with the widely deployed Node Energy Aware Backoff Algorithm (NEAB) and Time Window Adjustment Algorithm (TW2A), the proposed algorithm has shorter network convergence time,

收稿日期: 2018-11-19; 修改日期: 2018-12-28

基金项目: 安徽省职业教育学会教育科研规划项目(azjxh17034); 2017 年院级教学团队项目(2017YJTD01)

作者简介: *廖慧惠(1983-), 女, 安徽安庆人, 讲师, 硕士, 主要从事网络通信、物联网技术、电子电路等方面的研究(E-mail: lhh8319@sohu.com); 杜秀全(1982-), 男, 安徽滁州人, 副教授, 博士, 主要从事生物信息学、机器学习、物联网技术等方面的研究(E-mail: nwnulyy@126.com).

node read-write time, and single node write time. Node convergence frequency is small, channel noise convergence capture performance is excellent, thus the proposed algorithm has a strong practical deployment value.

Key words: Internet of things; channel evasion; optimal signal-to-noise ratio; signal interference; time stamp

0 引言

随着以区块链3.0为代表的工业化4.0新技术的不断推进,物联网安全收敛方案也面临严重的挑战;传统物联网安全收敛方案忽视网络攻击-测量防御的流动特性,难以在精确匹配程度上满足防御日益增长的安全威胁因素的需要^[1]。当前物联网安全收敛算法多集中在节点读写领域,因物联网节点主要作为数据采集节点之缘故,导致节点读写过程中收敛难度较大^[2]。

为了提高物联网节点作为数据采集-传输过程中的性能,进一步增强物联网节点读写过程中的安全收敛性能,研究者提出了许多具有前瞻性的研究领域,取得了一定的成就。Wang等^[3]提出了一种基于传输信道漂移博弈机制的物联网安全收敛算法,该算法采取窄带漂移机制,通过将物联网节点上传带宽与信令传输分割的方式,实现了密集节点状态下的网络安全收敛,且上传带宽性能卓越。不过,该算法的分割机制基于传输周期实现,且需要针对信令串进行能量赋值,因此该算法的抗噪性能较差,一旦信道噪声波动较大时,该算法的收敛性能将急剧衰退。Zhi等^[4]提出了一种基于随机裁决机制的物联网安全收敛算法,该算法主要采取主动广播信息报文的方式,实现对网络收敛过程中数据带宽的节约,能够显著降低物联网节点出现读写故障的可能性。不过,该算法仅从传输报文的角度出发,考虑到物联网节点采取广播机制具有一定的拥塞控制难题,若网络节点较多时,该算法的安全收敛性能将受到很大的影响。Catalina等^[5]提出了一种基于共线度平移机制的物联网安全收敛算法,该算法主要通过定义状态指针的方式实现对数据采集-传输过程的读写冲突之规避,能够实现密集节点状态下的网络收敛,然而该算法未针对物联网节点间串

频因素进行收敛度提升,使其传输性能较差,难以实现数据的高速安全收敛。

鉴于当前物联网安全收敛算法所采取的这些机制存在的不足之处,本文提出了一种基于随机博弈机制的物联网安全收敛算法,该算法首先采取信道噪声感知方式进行博弈,确定最佳覆盖半径,改善信号接收过程中需要进行的信号频率干扰难题;随后,通过能量-功率博弈方式匹配信道信噪比,对物联网节点进行基于时间戳机制的频率规避,大大改善了物联网节点的读写冲突难题,提高了网络安全收敛速率。最后,采用了MATLAB仿真实验环境,验证了本文算法的优越性能。

1 安全收敛模型

鉴于物联网节点信号发射过程具有高混沌特性,其频率漂移特性较强,实践中一般使用超高频方式进行数据读写^[6]。节点发射及接受过程均采用内置天线,考虑到物联网节点具有功率受限特性,即当且仅当各节点在射频覆盖范围内才能进行数据传输;当物联网节点指针进入其余节点覆盖范围时,该指针将通过内置天线主动应答各节点,通过反向代理的方式获取其余节点的射频信号载波频率并将自身信息通过该载波进行二次发射,随后用户通过捕捉该节点的射频信号频率,将控制信令传输至节点,实现对数据采集-传输的一体化控制。

由于物联网节点均采用内置天线进行无线覆盖,且覆盖过程中存在读写冲突区域,见图1,若节点分布较为集中时,不同节点间将由于射频频率具有相近特性而发生干涉现象^[7],从而导致数据读写失败。

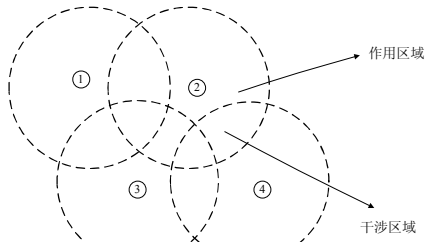


图 1 节点信号覆盖图

Fig.1 Node signal coverage map

1.1 物联网节点传输频率干涉现象

由于物联网节点的传输频率具有近似特性^[8], 物理位置较近时将产生显著的干涉效应, 见图2, 两个物联网节点若处于互相覆盖范围时, 若物联网节点与节点隶属的标签同时进行读写操作时, 则将由于干涉现象的发生而处于严重读写冲突的状态。

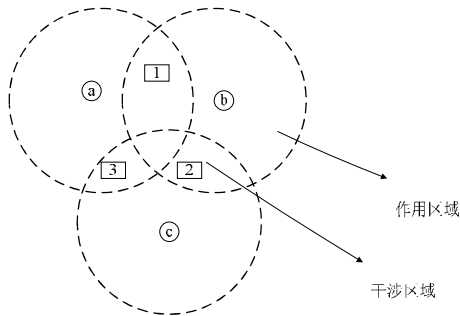


图 2 频率干涉示意图

Fig.2 Schematic diagram of frequency interference

1.2 多个节点间的同频率干涉现象

若单一区域存在多个互相影响的物联网节点时, 见图3, 一旦某个节点隶属的标签处于干涉区域时, 由于多个节点同时对该标签进行操作, 将产生严重的读写干扰现象。实践中往往采取载波漂移的方式, 将不同的标签与隶属的节点进行再匹配^[9], 但往往会存在节点传输性能较差的现象。

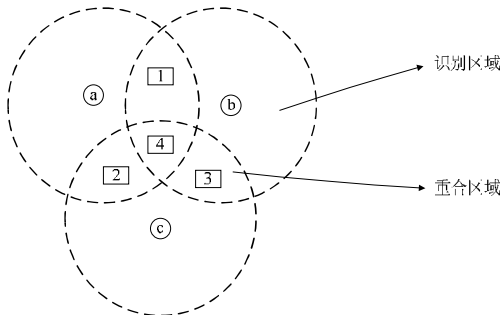


图 3 多节点干涉示意图

Fig.3 Multi-node interference schematic diagram

2 本文物联网安全收敛算法设计

针对当前物联网安全收敛算法存在的若干问题, 特别是上述模型所示的因节点干涉导致的收敛性能下降等问题, 如识别性能不准, 传输带宽较低等难题, 本文通过能量-功率感知方式构建随机博弈机制来改善。该机制分为两部分: ①基于信道信噪比的频率干涉消除机制, 该机制通过感知信道信噪比的方式对频率干涉现象进行区域消除, 降低因节点处于重合区域而导致频率干涉情况的发生; ②时间戳读写规避, 该规避方式主要采取时间戳匹配的方式, 进一步降低干涉现象的发生。

2.1 基于信道信噪比的频率干涉消除机制

设 n 为物联网中处于安全收敛状态的节点, 见图4, 处于干涉状态时的信道信噪比 $SI(n)$ 满足:

$$SI(n) = P(n) / I(n) \quad (1)$$

其中 $P(n)$ 与 $I(n)$ 正交调节方式如下:

$$I(n) = \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n F^{(k)}(\varphi) + T(\varphi) e^{-j\varphi\varphi_l} \quad (2)$$

$$P(n) = \sum_{l=1}^n F^{(n)}(\varphi_\lambda) + T(\varphi_\lambda) \sum_{l=1}^n e^{-j\varphi\varphi_l} \quad (3)$$

其中, $P(a)$ 表示信道发射功率, $I(a)$ 表示信道干涉噪声; $F^{(k)}(\varphi_\lambda)$ 为信源噪声干扰, 一般为拉普拉斯信道噪声, 均值为1, 标准差为0; $T(\varphi_\lambda)$ 该节点进行数据传输时的信道增益强度^[11]。

为防止物联网节点产生频率干涉现象, 通过模型(1)获取的信道信噪比强度高于信道进行数据传输时的最低信道信噪比强度 $SI(\min)$:

$$SI(n) = P(n) / I(n) > SI(\min) \quad (4)$$

由模型(1)~(4)可知, 一旦物联网节点处于干涉状态时^[9], 信号发射半径 $R_{act}(n)$ 与最佳半径 $R(n)$ 满足如下关系:

$$R_{act}(n) = R(n) \ln \int \frac{SI(n)}{SI(\min)} dR(n) \quad (5)$$

考虑到物联网信道发射过程满足拉普拉斯条件^[10], 结合模型(2)~(5)可知:

$$R_{act}(n) / R(n) > \ln(1 + R(n)) \quad (6)$$

其中 $\ln$ 表示自然对数。

由模型(6)可知, 若欲降低物联网节点间干

涉情况,则需要提高节点间的信号发射半径;通过模型(6)的方式动态调整信号发射半径,在最佳半径的条件下即可保障物联网节点间的信号不出现信号干涉现象,从而大大提升收敛速度。

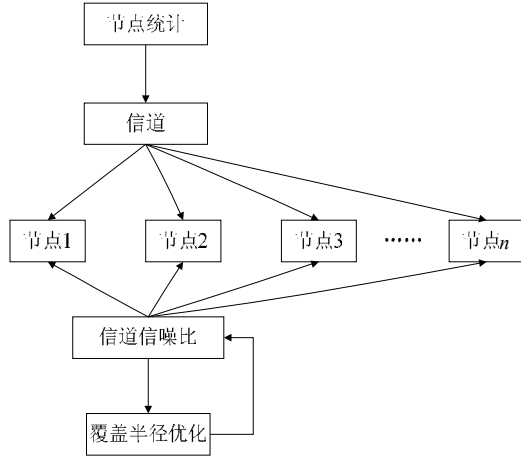


图4 基于信道信噪比的频率干涉消除机制

Fig.4 Frequency interference cancellation mechanism based on channel signal-to-noise ratio

2.2 时间戳读写规避机制

通过信道信噪比的频率干涉消除机制可实现物联网节点间的最佳覆盖,实现射频发射过程中频率干涉现象的消除,但由于单纯通过该机制并未考虑不同节点间因信道占用而导致的频率漂移现象,该现象同样会导致信道干涉现象的发生;因此本文针对信道干涉问题,通过时间戳读写方式实现节点规避,该机制由两个部分构成:

① 信道信噪比漂移消除

将模型(4)确定的最低信道信噪比强度 $SI(\min)$ (见图5)进行初次消除:

$$p(0, i) = SI(\min) \quad (7)$$

$$p(0, i+1) = p(0, i) \exp(SI(\min) - SI) \beta \quad (8)$$

其中 $p(0, i)$ 表示第 i 个节点对应的发射功率, SI 表示第 i 个节点对应的信道传输能力; $\exp$ 表示自然对数; β 为信道衰减系数,用来衡量信道中信号衰落强度。

② 时间戳调整

获取物联网节点发射信号时基准时间 $Time$ (见图6),并获取调整时间 T :

$$T = Time \int \ln(\mu + e) SI(\min) ds \quad (9)$$

其中 e 为自然指数, μ 为调节参量, $\ln$ 表示自然对

数;当信道中无干扰时 μ 取0,此时信道发射过程中各物联网节点将不存在干涉现象;若干涉现象发生时 $\ln(1 + e)Time - T$ 的时间长度处于待发射状态,即待发射状态下物联网节点按照时间频率进行信号发射,将不会产生干涉现象,见图5。

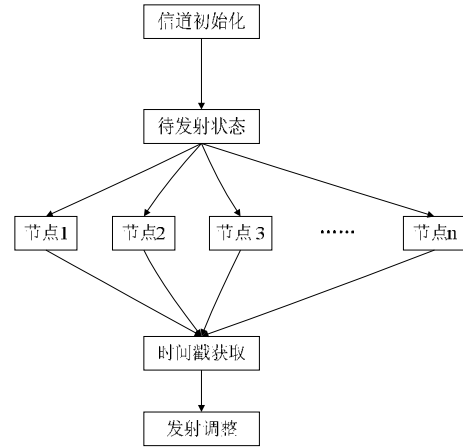


图5 时间戳读写规避机制

Fig.5 Timestamp read and write avoidance mechanism

3 仿真实验与分析

为便于验证本文算法的有效性,采用MATLAB仿真实验环境,对照组算法为当前物联网部署中常用的节点能量感知退避算法^[12](Node Energy Aware Backoff Algorithm, NEAB机制)、时间窗口感知调整算法^[13](Time Window Aware Adjustment Algorithm, TW2A机制)。仿真指标采用网络完全收敛时间,节点读写时间,单节点最大收敛次数,信道噪声收敛捕捉性能四个指标;物联网节点射频频率采用当前通用的2.49GHZ的标准射频信号,初始作用距离为12 m。本文实验的其他参数设置见表1。

表1 仿真参数表

参数	数值
传输带宽	不低于 1096 bps/s
信号周期(min)	24
数据传输速率(Mbps)	不低于 1024 bps/s
节点密度 (m ²)	不低于 12

3.1 网络完全收敛时间

图6为网络完全收敛时间的仿真对比情况,由图可知,随着信道信噪比的不断提高,本文算法与NEAB机制及TW2A机制均出现了网络完全收敛时

间不断增加的态势,这是显然的:网络信道噪声随着信道信噪比不断增加,使得物联网节点的最大覆盖半径不断提高,出现节点间互相干涉的可能性也随之上升,数据读写过程中容易出现冲突现象,致使网络完全收敛过程趋于缓慢。然而本文算法的网络完全收敛时间始终处于较低水平,性能卓越;这是由于本文算法考虑到物联网节点容易出现的信道干涉现象,通过基于信道信噪比的频率干涉消除机制有针对性地消除了节点信号感知过程中存在的频率干涉现象,降低了因频率干涉导致数据读写失败事件的发生概率;此外本文算法考虑到信道间频率干涉的事件,构建时间戳读写规避机制,进一步改善因节点发射过程中固有的频率漂移而出现干涉的可能,因此收敛性能卓越;NEAB机制主要通过节点能量感知方式动态调整节点覆盖半径,需要通过补充能量的方式实现对节点半径的最优覆盖,可操作性较差;TW2A机制主要通过捕捉信号发射频次的方式动态调整信号发射周期,并未对信道噪声现象进行有针对性的消除,因此两者在实践中具有收敛缓慢的特点,其网络完全收敛时间要高于本文算法。

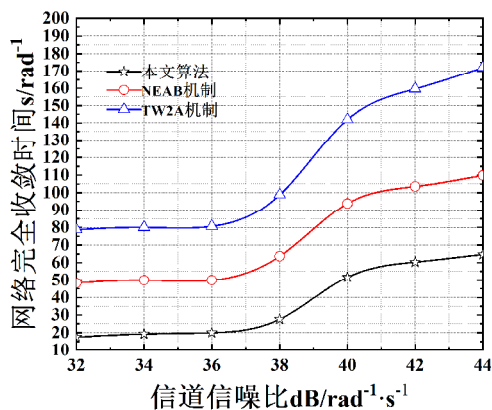


图 6 网络完全收敛时间的测试结果

Fig.6 Test results of complete convergence time of network

3.2 节点读写时间

图7为节点读写时间的仿真对比情况,显示了随着信道信噪比不断提高时不同的物联网节点在互相交互数据时的性能。由图可知,本文算法与NEAB机制及TW2A机制在信道信噪比不断提高时均出现了节点读写时间不断上升的现象;这是显然的:节点读写性能由覆盖半径决定,随着信道信噪比的不断提高,节点最佳覆盖半径也因噪声干扰而出现波

动现象,导致数据读写过程发生紊乱。不过本文算法的节点读写时间始终处于较低水平,且波动性远远小于对照组NEAB机制及TW2A机制;这是由于本文算法针对节点读写过程中存在的因区域重叠而导致读写失败的现象,能够通过信道信噪比的频率干涉消除机制抑制信道噪声,直接表现为覆盖区域和重叠区域的可调可控,因而不同节点间的覆盖区域不会随着信道信噪比的降低而出现急剧波动的现象,由此导致的节点读写失败问题也能得到有效的抑制;NEAB机制及TW2A机制虽然能够对信道噪声进行一定程度的抑制,但两者均无法直接从覆盖区域-重叠区域性能上直接进行读写时间控制,其中,NEAB机制仅能调整节点能量,TW2A机制仅能调整节点信号发射周期,因此对信道噪声的抑制程度有限,因而对照组算法对节点读写性能的精确控制方面逊色于本文算法。

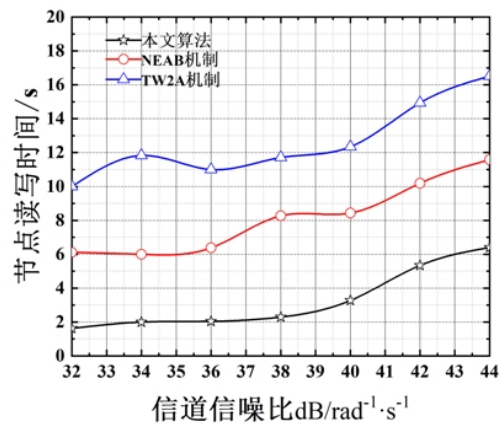


图7 节点读写时间的测试结果

Fig.7 Test results of node read-write time

3.3 单节点最大收敛次数

图8为单节点最大收敛次数的仿真对比情况,显示了随着信道信噪比不断提高时网络中单节点在数据传输完毕后对收敛次数的仿真统计。由图可知,虽然本文算法与NEAB机制及TW2A机制在信道信噪比不断提高时,最大收敛次数上升的态势,然而本文算法的最大收敛次数始终低于NEAB机制及TW2A机制在信道信噪比不断提高时。这是由于本文算法针对节点发射过程中存在的互相冲突现象,特别设计了时间戳读写规避机制,能够保证不同节点在发射信号时均可以通过调整时间戳的方式实现信道规避,故而本文算法能够显著提高节点读写性能,规避读写冲突,提升收敛性能,因此单

节点最大收敛次数要显著低于对照组算法。NEAB机制主要调整节点功率的方式提高数据传输性能,但并未对信号发射信道中存在的碰撞现象进行规避;TW2A机制虽然能够通过调整节点信号发射周期的方式对信道碰撞现象进行初步规避,但由于单纯调整节点信号发射周期的方式难以应付复杂环境下的信号发射现象,因此无论NEAB机制还是TW2A机制均难以与本文算法匹敌,故而本文算法在单节点最大收敛次数性能上占优。

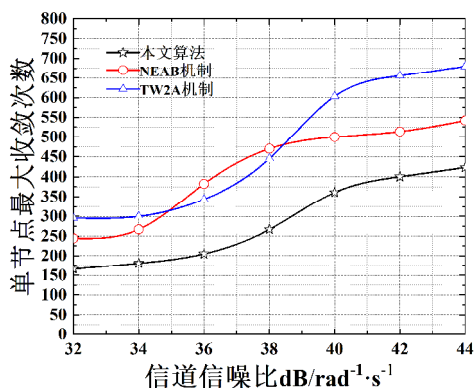


图8 单节点最大收敛次数的测试结果

Fig.8 Test results of maximum convergence times for single node

3.4 信道噪声收敛捕捉

图9(a)为信道传输信号源,图9(b)~(d)分布为本文算法、NEAB机制及TW2A机制对信道噪声捕捉后的信道传输信号源。由图可知,本文算法的信道噪声捕捉性能卓越,能够捕捉的信道噪声类型及强度均要高于NEAB机制及TW2A机制,其接收端的图像仅存在轻微模糊,而NEAB算法的接收图像存在噪声,飞机机身部分存在形状失真现象;TW2A算法的收敛捕捉能力较弱,接收图像存在较大视觉失真问题。原因是所提算法针对物联网节点普遍容易发生的信道干涉现象,可通过信道信噪比的频率干涉消除机制进行噪声预消除,有效降低噪声信号在信道传输信号源上的投影,并通过动态调整最佳覆盖半径,显著减少节点间互干扰现象,可消除信源内噪声的影响。NEAB机制及TW2A机制对信道噪声均采用简单匹配的方式进行初步过滤,即仅当信道传输信号源中噪声能量均值达到一定阈值时才能启动噪声过滤机制,针对性不强,精确性不够,因此能够显示的噪声强度较弱,对信道噪声收敛捕捉性能要低于本文算法。

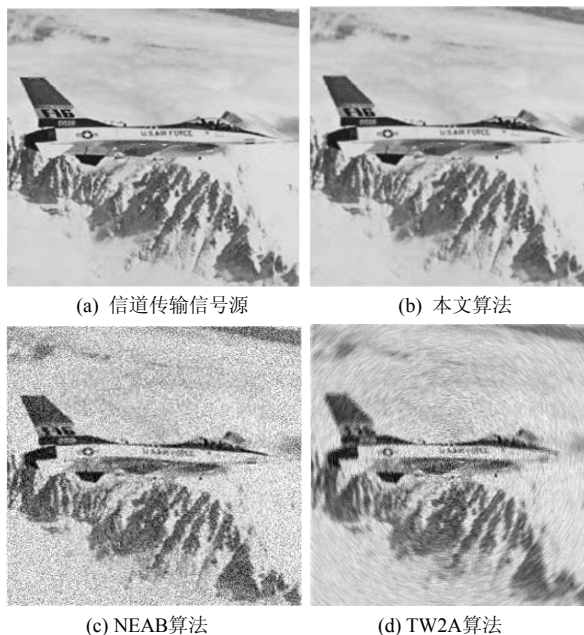


图9 信道噪声收敛捕捉性能测试

Fig.9 Channel noise convergence capture performance test

4 结束语

鉴于当前广泛采用的物联网安全收敛机制存在收敛性能较差,如节点读写冲突,完全收敛时间较长,噪声捕捉能力低下等不足,提出了一种基于随机博弈机制的物联网安全收敛算法。算法主要由两个部分构成:基于信道信噪比的频率干涉消除机制;时间戳读写规避。前者能够显著消除节点间互相干涉现象,提升数据传输质量,增强安全收敛性能;后者能够显著消除节点读写冲突,且能够精确调整节点发射次序及时间,极大的提高了网络安全收敛过程中的精确程度。最后,使用MATLAB仿真实验环境,验证了本文算法的有效性。

下一步,将针对本文算法对流动性较大的移动物联网适应性不好的问题,引入区块链调整机制,通过区块链不可篡改的特性进行网络性能提升,进一步提高网络收敛性能,以便适应更为复杂的网络环境及实际部署环境。

参考文献:

- [1] Yong A G, Hong B Z, Long X Y. Smart Service System (SSS): A Novel Architecture Enabling Coordination of Heterogeneous Networking Technologies and Devices for Internet of Things[J]. Chinese Journal of Electronics, 2017, 14(03): 130-144.

- [2] Wu Q L, Liang Y. Factors Acquisition and Content Estimation of Farmland Soil Organic Carbon Based upon Internet of Things[J]. Chinese Geographical Science, 2017, 27(3): 431-440.
- [3] Wang Y B, Gong B. Trust Attestation Mechanism for the Sensing Layer Nodes of Internet of Things[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2017, 22(4): 337-345.
- [4] Zhi P C, Anu B, Wei T T. Guest Editorial: Special Issue on Internet of Things[J]. Tsinghua Science and Technology, 2017, 22(4): 343-344.
- [5] Catalina A S, Mihaela C. Distributed Algorithms for Event Reporting in Mobile-Sink WSNs for Internet of Things[J]. Tsinghua Science and Technology, 2017, 22(4): 413-426.
- [6] Liu X Y, Jiang J. SINR Driven Joint Network Selection Policy in the Heterogeneous Internet of Things[J]. Chinese Journal of Electronics, 2017, 26(4): 842-848.
- [7] 马荣飞. 基于物联网技术网络自适应移动节点资源监测研究[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(5): 1725-1728.
- [8] Ma R F. Research on the Monitoring of Adaptive Mobile Node Resources Based on Internet of Things Technology [J]. Computer Engineering and Design, 2012, 33(5): 1725-1728.
- [9] 杨斌,郝杨杨. 面向监测应用的传感网节点布局方法研究[J]. 计算机工程与科学, 2014, 36(7): 1255-1261.
- [10] Yang B, Hao Y Y. Study on the Layout of the Internet of Things for Monitoring Applications [J]. Computer Engineering and Science, 2014, 36(7): 1255-1261.
- [11] Zhen X L. A Survey on Data Dissemination in Wireless Sensor Networks [J]. Journal of Computer Science & Technology, 2014, 3(11): 470-486.
- [12] Bei G, Yu B W. A Trusted Attestation Mechanism for the Sensing Nodes of Internet of Things Based on Dynamic Trusted Measurement[J]. Chinese Geographical Science, 2018, 15(2): 100-121.
- [13] Ding Z, Ching C C, George Y Z. Enabling Industrial Internet of Things(IIoT) towards an emerging smart energy system[J]. Global Energy Interconnection, 2018, 1(1): 39-47.
- [14] Shen W Z, Wang S Y, Nagi E B E. Design of Greenhouse Environment Control System Based on Internet of Things[J]. Journal of Northeast Agricultural University (English Edition), 2018, 25(2): 54-64.
- [15] Wu Z, Liu L H. A Community Health Service Architecture Based on the Internet of Things on Health-Care[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2016, 25(3): 114-120.

(上接第 44 页)

- [8] Jia D, CAO J, Song W D. Colour FAST (CFAST) Match: Fast Affine Template Matching for Colour Images [J]. Electronics Letters, 2016, 52(14): 1220-1221.
- [9] 彭勃宇,王崴,周诚. 面向增强现实的 SUSAN-SURF 快速匹配算法[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(8): 2538-2542.
- [10] Dou J F, Qin Q, Tu Z M. Robust Image Matching with Cascaded Outliers Removal[J]. Pattern Recognition and Image Analysis, 2017, 27(3): 480-493.
- [11] Beatriz O, Eva R, Jacint V. SURF-Based Mammalian Species Identification System[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(7): 10133-10147.
- [12] Zhang E L, Ma J, Wang X T. Improved SURF Algorithm for Color Remote Sensing Image Registration[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2017, 32(2): 144-152.
- [13] Sun Y W, Li H, Sun L. Use of Satellite Image for Constructing the Unmanned Aerial Vehicle Image Matching Framework[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2017, 11(1): 1-12.
- [14] Bo Y, Bahetiyaer B, Ke L. Learning Quality Assessment of Retargeted Images[J]. Signal Processing: Image Communication, 2017, 56(1): 12-19.
- [15] Seonyeong P, Siyong K, Byongyong Y. A Novel Method of Cone Beam CT Projection Binning Based on Image Registration[J]. IEEE Trans Med Imaging, 2017, 36(8): 1733-1745.
- [16] 吴鹏徐,洪玲,宋文龙. 结合小波金字塔的快速 NCC 图像匹配算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(5): 791-796.
- [17] Sebastián C C, José G G. SIFT Optimization and Automation for Matching Images from Multiple Temporal Sources[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 57(1): 113-122.