

基于位置服务室内节点的信道分配模型与可信度评估

刘昭斌^{1,2*}, 刘文芝¹, 方立刚¹, 唐亚哲²

(1. 江苏省现代企业信息化应用支撑软件工程技术研究中心, 江苏 苏州 215104;

2. 西安交通大学 电子与信息工程学院, 西安 710049)

(* 通信作者电子邮箱 zblusz@126.com)

摘要:针对位置服务(LBS)在深度室内环境下将无法进行GPS定位问题,提出一种融合GPS、Wi-Fi、ZigBee和蓝牙混合的LBS室内节点信道分配模型和可信度评估与控制方法。信道分配模型解决了组合信道分配包括业务负载判断和每个节点的可用射频及非重叠的射频信道的数量问题。通过对每一个接入点(AP)的信号强度建立与参考点的信号强度的预测模型,采用基于能量度量优化算法判断选择组合信道可信度,自适应选择性能好的邻居节点参与迭代优化。仿真结果表明,该方法能有效抑制通信干扰误差在网络内的扩散,降低定位复杂度,提高定位精度,同时提高整个网络的扩展性与鲁棒性。

关键词:基于位置服务;信道分配;可信度;评估;能量度量

中图分类号: TN911.25; TP393.17 **文献标志码:** A

Channel allocation model and credibility evaluation for LBS indoor nodes

LIU Zhaobin^{1,2*}, LIU Wenzhi¹, FANG Ligang¹, TANG Yazhe²

(1. Jiangsu Province Support Software Engineering Research and Development Center for
Modern Information Technology Application in Enterprise, Suzhou Jiangsu 215104, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China)

Abstract: In response to the issue that GPS is unable to carry out Location-Based Service (LBS) in indoor environment, a LBS indoor channel allocation model, credibility evaluation and control method was presented in this paper, which integrated GPS, Wi-Fi, ZigBee and Bluetooth technologies. It solved the problem arising from combination channel allocation, including the evaluation of the traffic load, the available Radio Frequency (RF), and non-overlapping RF channels number of each node. Each Access Point (AP)'s signal strength built the prediction model with reference point. The optimization algorithm was designed to determine and select the credibility of combination channel based on the energy evaluation. It adaptively selected neighbors with highest comprehensive effects to participate in iterative optimization. The simulation result indicates this method can effectively inhibit the proliferation of communication interference error in the network, reduce the positioning complexity, and improve the positioning accuracy in addition to improving scalability and robustness of the entire network.

Key words: Location-Based Service (LBS); channel allocation; credibility; evaluation; energy measure

0 引言

随着物联网在芯片、传感器、近距离传输、海量数据处理,以及综合集成等领域的应用,要实现大量远程和移动的数据采集、传输和位置感知定位。在开阔的室外环境中,LBS常用的定位技术是GPS,但是,对室内定位信息需求与日俱增的今天,校园、博物馆、大型体育场馆、机场、展厅、写字楼、仓库、地下停车场和工厂车间等都需要使用准确的室内无线局域网定位信息^[1-2],但GPS定位存在局限性,在深度室内环境下将无法进行GPS定位。因此,GPS、Wi-Fi、蓝牙和ZigBee射频识别技术串起了组合定位技术发展的主线^[3-4],除了Wi-Fi、ZigBee和蓝牙节点以外,设备中的传感器、陀螺仪、罗盘、加速计等都可以为定位和追踪提供辅助数据,如图1所示。

目前,无线网络感知信道分配与定位的研究大都集中在物理层^[5-6]和MAC层^[7]的功能上,如频谱感知技术。但对于更高层如路由层和应用层仍未有完善的研究,因为感知无线

网络中频谱在时间和空间上存在间断性,使得感知无线网络中的信道路由设计面临很大的挑战^[8]。文献[9]针对多跳感

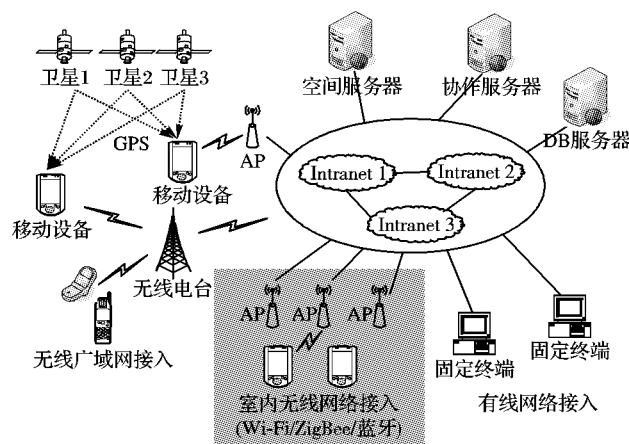


图1 LBS定位拓扑结构

收稿日期:2012-09-10;修回日期:2012-11-18。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61170245);江苏省科技计划项目(BK2012164);苏州市科技计划项目(SYC201257)。

作者简介:刘昭斌(1965-),男,山东威海人,副教授,CCF高级会员,主要研究方向:感知计算、无线传感器网络;刘文芝(1967-),女,湖南衡阳人,副教授,主要研究方向:无线传感器网络;方立刚(1980-),男,安徽歙县人,副教授,博士,主要研究方向:传感器应用、地理空间信息;唐亚哲(1970-),男,陕西西安人,副教授,博士生导师,博士,主要研究方向:无线网络、网络安全。

知无线网络设计了一种基于单信道的射频感知按需路由协议模型与算法;文献[10]针对多信道感知无线网络提出了一种利用 Dijkstra 算法的最小传输时延的算法;文献[11]针对信道分配控制提出了降低整个感知网络的干扰的规划算法;文献[12]设计了采用竞争或者分时调度的方法共享无线信道和定位协议,它解决了传统基于窗口竞争协议所引起的信道忙时竞争频繁和时延较大问题,使得局部分簇区域内部分节点能在短时间内无冲突地通告事件;文献[13]针对 Sift、X-MAC 和调度协议的思想提出了一种混合型信道分配算法 Crankshaft,该算法利用超帧结构和退避算法,缓解了感知无线网络中节点密集部署时的竞争问题;文献[14]把信道分配和路由相结合的问题分解成一系列的优化子问题,提出一种考虑负载和干扰的广义分割的 mesh 网络信道分配策略,解决了丢包率、冲突概率和业务流之间的公平性问题;文献[15-16]提出一种将链路调度和信道分配联合的新方法来优化感知无线网的容量和吞吐量。但上述算法在信道分配时对时间同步要求较高,广播时隙较少且集中,使得广播数据的发送效率较低;没有考虑移动节点的频谱资源的动态性和随机性,如果提高邻居发现过程执行的频率,节点能量消耗又太大;上述方法在分配控制上采用复杂的分布式控制,可能导致整个网络的抖动。

在多信道室内感知无线网络中,由于频谱资源的动态性和随机性,相邻节点可能因为工作在不同信道上而无法通信,正在通信的节点可能因为随机移动节点的出现而中断链接,因此,针对随机移动节点引起各节点之间的可用信道集动态变化的特点,本文提出了一种在具有多信道的感知无线网络中基于位置服务(Location-Based Service, LBS)室内节点的信道分配模型。该模型用线性规划(Linear Programming, LP)的联合路由和信道分配模型^[17-18]对随机移动目标节点与射频进行建模,并用模型中参考节点占用授权频带的活动概率定义目标节点使用该授权频带的稳定性,寻找受目标节点影响最小的路由并在增加路由判据来选择在频谱中流量大的信道中完成信道分配,自适应判据跳变信道将表现差的信道进行屏蔽,改善与其他射频系统共存的性能。考虑业务负载和干扰的影响,使用空闲信道评估避免与其他非同步系统的冲突^[19]。这种基于时隙的通信降低了 2.4 GHz 频段的拥塞,而且邻近的系统通过丢包率很快会知道有信道被占用了。

1 信道分配模型

假设一个具有多信道的 LBS 室内环境,可用图 $G = (N, N', L)$ 来表示,其中 N 代表节点集, N' 代表干扰节点集, L 代表节点对通信的链路。有一个网关接入点(Access Point, AP) $n_0 \in N$, 它和因特网相连,并且其他任何节点发送给因特网的业务流直接通过 n_0 。 N_n 表示在节点 n 的有效传输范围内的节点集, N'_n 表示在节点 n 的干扰范围内的节点集,假设有 K 条正交的无线信道且每条信道的带宽是 c , $k(n)$ 表示节点 n 的射频数量。该系统工作于周期同步时隙模式,其中每个周期包含 T 个时隙。每个时隙 $t(t = 1, 2, \dots, T)$ 中每个(链路,信道)对是活动的,在不同时隙,将通信业务分配给活动的(链路,信道)对。具体地说,有一条通信链路 $l = (n, d) \in L$, 有且仅有节点 n 和 d 在射频的有效传输范围内,节点可以通过无线通信链路和其他节点进行通信。

定义 1 当且仅当链路 $(n, d) \in L$ 在时隙 t 和信道 k 上是活动时^[20], $f_{nd}^{kt} = 1$; 否则, $f_{nd}^{kt} = 0$ 。 $\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T f_{nd}^{kt}$ 为链路 (n, d) 在

信道 k 上的利用率, $\frac{c}{T} \sum_{t=1}^T f_{nd}^{kt}$ 为相应的可用带宽。为了实现这个链路,任何信道分配都必须符合以下两个约束。

1) 信道约束。在任何时候,一个节点可以使用最多 $k(n)$ 个不同的信道发送数据包。

$$\sum_{d \in N_n} \sum_{k=1}^K f_{nd}^{kt} < k(n); \forall n \in N; t = 1, 2, \dots, T \quad (1)$$

式(1)成立的必要条件是:

$$\sum_{d \in N_n} \sum_{k=1}^K \left(\frac{c}{T} \sum_{t=1}^T f_{nd}^{kt} \right) \leq ck(n); \forall n \in N \quad (2)$$

2) 干扰约束。在任何时候,两条干扰链路不能活跃在同一信道中,对于链路 $l = (n, d)$ 来说应满足。

$$\sum_{n' \in N_d \cup N'_d} \sum_{d' \in N'_{n'}} f_{n'd'}^{kt} \leq 1; \forall (n, d) \in L; k = 1, 2, \dots, K; t = 1, 2, \dots, T \quad (3)$$

式(3)成立的必要条件是:

$$\sum_{n' \in N_d \cup N'_d} \sum_{d' \in N'_{n'}} \left(\frac{c}{T} \sum_{t=1}^T f_{n'd'}^{kt} \right) \leq c; \forall (n, d) \in L; k = 1, 2, \dots, K \quad (4)$$

式(1)和(3)描述了一个可行的信道分配方案的充分必要条件。它定义了一个时变网络,通过该网络,AP 可用来发送通信包。 $\sum_{t=1}^T f_{nd}^{kt}$ 是一个周期内链路 (n, d) 在信道 k 上所有活动时隙的总和,通过上述的定义,在通信网络中,就可以为业务需求 b_n 增加路由判据。为此,需要为每个节点实行流守恒约束^[21-22]。

$$\sum_{d \in N_n} \sum_{k=1}^{k(n)} \left(\frac{c}{T} \sum_{t=1}^T f_{nd}^{kt} \right) + b_n^k = \sum_{d \in N_n} \sum_{k=1}^K \left(\frac{c}{T} \sum_{t=1}^T f_{nd}^{kt} \right); \forall n \in N; n \neq n_0 \quad (5)$$

$$\max \left(\sum_{n \in N} b_n^k, \sum_{n \in N} \xi b_n \right); 0 \leq b_n^k \leq b_n, 0 \leq \xi \leq 1 \text{ 且 } b_n^k \geq \xi b_n \quad (6)$$

其中 b_n^k 是节点 n 发出的业务流。式(2)通过式(5)定义了路由和信道分配的基本结构,使每个节点都至少可以发送它业务需求的 ξ 部分,式(6)为总的最大化吞吐量。

通过组合信道分配的两个约束条件,LBS 的室内节点通过跳变信道机制来避免工作在相同频段的其他射频设备的干扰,更好的鲁棒性也降低了多径干扰的影响。LBS 的室内节点还通过业务需求 b_n 增加路由判据来选择在频谱中流量大的信道,改善了与其他射频系统共存的性能。自适应判据跳变信道模型将表现差的信道进行屏蔽^[23],也提高了系统的可靠性。

2 信道分配可信度评估与控制

根据 AFL 算法^[24]、SSOLA 算法^[25]和质子弹簧模型^[26],本文提出一种能量度量优化算法来判断跳变信道可信度。设 n 节点($n \in N_n$)当前信道活动为 f_{nd}^{kt} ,它定期给邻居发送自己的业务流 b_n^k ,同样地也掌握了所有邻居的业务流 b_d^k 。 n 计算出至某邻居 d 的估计信号强度 s_{nd} ,另外已知到 d 的实测信号强度值为 r_{nd} 。如果以 \mathbf{v}_{nd} 表示 n 到 d 方向的单位向量,方向 \mathbf{v}_{nd} 的分量为:

$$\mathbf{F}_{nd} = \mathbf{v}_{nd} (r_{nd} - s_{nd})$$

则 n 所受合力为:

$$\mathbf{F}_n = \sum_d \mathbf{F}_{nd} \quad (7)$$

采用 n 与 d 之间的能量 P_{nd} 度量信道可信精度, n 的总能

量为:

$$P_n = \sum_d P_{nd} = \sum_d (s_{nd} - r_{nd})^2 \quad (8)$$

可通过分析信道分配的必要条件,可判断选择在频谱中流量大的信道节点 d ,由此定义节点的信道分配可信度^[27]。如果节点 d 的估计信号强度偏差很大,跳变信道可信度较低,则执行一个称作信道变异的操作策略,使这些节点跳出迭代优化过程中可能陷入的局部最优解,从而选择信道误差较大的节点有机会得到坐标修正^[28]。

可信度定义:

$$R_n(d) = [A(d) + B(n) \times r_{nd}]^{-1} \quad (9)$$

其中: $A(d)$ 为节点 d 自身信号强度误差, $B(n) \times r_{nd}$ 为节点 d 与节点 n 的实测值 r_{nd} 所引入的测量误差。

$$A(d) = \sum_{d=1}^M |r_{nd} - s_{nd}| / M \quad (10)$$

$$B(n) = \left\{ \sum_{d=1}^M |r_{nd} - s_{nd}| \right\} / \left\{ \sum_{n=1}^M s_{nd} \right\} \quad (11)$$

其中: M 为上次迭代计算中,节点 n 所选择参与优化计算的精选邻居数,该定义规定节点信道的可信度与节点的误差成反比,误差越小,节点信道的相对可信度越高。

1) 信道可信度表明与邻居的通信是否可靠,判断节点的信道分配可信度是否小于规定阈值:如果小于,则执行信道变异策略;否则执行质点弹簧模型。该步骤由假设 n 节点启动,逐渐扩散至其他节点,信道调精的次序是依据邻居关系遍历至邻居节点。每个节点只要执行一次信道修正,就将修正后的信道分配给其邻居。

2) 根据式(7)可得:

$$\dot{F}_n = \sum_{d=1}^M v_{nd} (r_{nd} - s_{nd})$$

其中 M 为邻居数目。某节点 n 的信道调整过程如下:节点 n 在所受的合力的反向移动一个偏移量 $|\dot{F}_n|$ 。信道变异策略过程如下:取节点邻居中信道可信度最高的前3个节点,当节点 n 向合力方向 \dot{F}_n 的反向移动一个极小量,其能量 P_n 减少,确定信道的修正量。

3) 迭代中止的判断准则可采取以下任一种:①节点能量接近于0或小于某阈值;②迭代次数到达规定值;③节点的估计信号强度在最近的若干次迭代内不再变化。

3 仿真分析

通信半径 $R=10$ m,由8个参考节点,24个各种无线终端节点组成的小网络。此32个节点随机分布在 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的区域内,随机产生了37个不同的计算网络,每个网络平均由3个参考节点和7个未知节点组成。图2显示了基于LBS室内节点的信道分配模型得到的全局目标移动节点运动轨迹相对位置图。

某移动节点移动到某些区域时,即使在相同频段的其他射频干扰下,目标也能被较好地跟踪,模型可将表现差的信道进行屏蔽。这是因为在这些区域利用有效传输范围内的节点集,定期给邻居发送自己的业务流,计算出至某邻居的估计信号强度,能够很好地完成对目标的跟踪。但是也能看出,在某些区域,当参考节点远离目标时,尽管这些参考节点仍然能够感知到目标,但已经不能够对目标再进行准确跟踪了。从图中可看出,在有效传输范围内的节点集区域,若参考节点加入到目标的跟踪过程多,目标的跟踪精度得到了显著的提高,目标的跟踪范围得到了扩展。

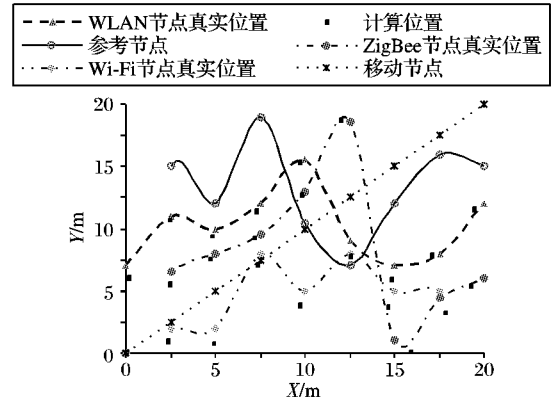


图2 在运动轨迹下的不同节点定位情况

图3显示的是采用基于LBS室内节点的信道分配模型定义的一个时变网络的节点信道定位的情况:1)移动节点的有效传输范围内的节点集数量逐渐增加,执行业务需求的路由判断来选择跳变信道,避免在相同频段的其他节点射频信道的干扰。信道定位误差明显下降,当有效传输范围内的节点为5个时,定位误差从0.125下降到0.075。有效传输范围内的节点为10个时,两条曲线趋势为0.05。2)有效传输范围内的干扰节点较少时,业务需求对频谱中流量大的信道的选择概率越大。业务量为4个时,通信效率为0.28;而为10个时,改善了0.19。也就是说,业务需求大时,可以增加一个时变网络,通过增加虚拟参考锚点,增加了有效的发送通信包。3)参考锚点增加,定位误差也会减少,但减小范围有限。且随着邻居点的增多,曲线趋于平缓 and 接近。

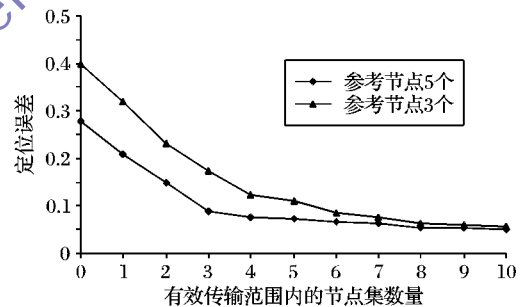


图3 定位误差测试

图4显示的是采用基于能量度量信道可信精度的优化算法节点通信中断概率的差别。从图4可看出,在中断概率的比较中,基于自适应判断跳变信道模型的能量度量优化可信度评估算法的中断率远小于LP的联合路由和信道分配算法。LP算法的中断概率分布均匀,而能量度量优化可信度评估算法在时间循环的初期几乎不存在用户中断,随着循环时间的变化,能量度量优化算法的中断概率明显较LP算法少。

图3~4表明,利用本文方法,LBS室内节点可以得到比较高的信道再定位精度,由此可以看出,利用信道分配模式和

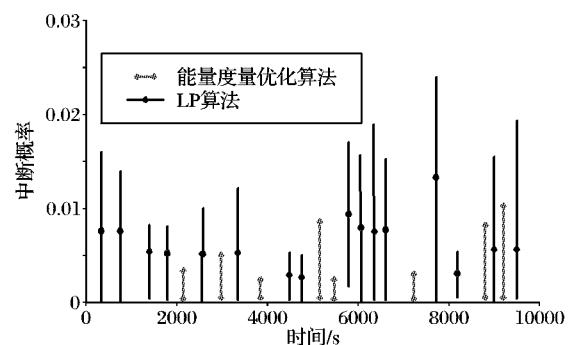


图4 节点间通信中断概率对比

可信度评估与控制方法和能量度量优化算法来判断跳变信道可信度可以成功地融合 GPS、Wi-Fi、ZigBee 和蓝牙混合网络中的节点进行定位,且移动节点定位成为已知节点后,可以有更多的已知节点参与到目标跟踪过程中来。

4 结语

本文提出了一种适应于情境感知的基于 LBS 室内节点的信道分配模式和可信度评估与控制方法。针对组合信道分配包括业务负载判断和每个节点的可用频谱及非重叠的射频信道的动态特性,基于 LP 的基本思想,对其进行了扩展,提出一种新的用线性规划将链路调度和信道分配联合的方法来优化动态时变感知网络信道容量和吞吐量,利用组合信道链路的两个约束条件来辅助分配,在端到端的时延、总的吞吐量、抗干扰性和定位误差方面优于以前的算法。另外,分析了模型中信道选择阶段的计算可信度,采用能量度量优化算法来判断多信道跳变的选择的可信度。仿真结果表明,通过业务需求路由判断来选择在频谱中流量大的信道,改善了与其他射频系统共存的性能。通过与相同测试条件下的 LP 算法结果进行对比分析,本模型将表现差的信道进行了屏蔽,在定位的过程中,可以融合 GPS、Wi-Fi、ZigBee 和蓝牙混合设备的支持,对感知网络的拓扑结构具有较强的适应性,中断概率明显下降,提高了分组的平均查询时延。由于参考点选取对模型起关键作用,冗余的参考点会造成计算准确性下降,因此,需要对如何选择参考点,以及 AP 与参考点所对应的信号强度建立关系模型,也是下一步要研究的重点。

参考文献:

- ARIAS J, LAZARO J, ZULOAGA A, *et al.* GPS-less location algorithm for wireless sensor networks [J]. *Computer Communications*, 2007, 30(14): 2904 - 2916.
- YANG X, ZHANG S, WANG J. Target locating technology and system exploitation based on the GPS technology [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2009, 16-19: 1238 - 1242.
- FERIZI A, HOEHER B, JUNG M, *et al.* Design and implementation of a fixed-point radix-4 FFT optimized for local positioning in wireless sensor networks [C]// *Proceedings of the 9th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices (SSD)*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2012: 1 - 4.
- BILGIN B E, GUNGOR V C. Performance evaluations of ZigBee in different smart grid environments [J]. *Computer Networks*, 2012, 56(8): 2196 - 2205.
- YUCEK T, ARSLAN H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications [J]. *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, 2009, 11(1): 116 - 130.
- YIN W, REN P, SU Z, *et al.* A multiple antenna spectrum sensing scheme based on space and time diversity in cognitive radios [J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2011, E94-B(5): 1254 - 1264.
- WANG Y, REN P, SU Z. A POMDP based distributed adaptive opportunistic spectrum access strategy for cognitive Ad Hoc networks [J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2011, E94-B(6): 1621 - 1624.
- CESANA M, CUOMO F, EKICI E. Routing in cognitive radio networks: challenges and solutions [J]. *Ad Hoc Networks*, 2011, 9(3): 228 - 248.
- MA H, ZHENG L, MA X, *et al.* Spectrum aware routing for multi-hop cognitive radio networks with a single transceiver [C]// *Proceedings of IEEE CrownCom*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2008: 1 - 6.
- LI Y, QIN F, LIU Z, *et al.* Cognitive radio routing algorithm based on the smallest transmission delay [C]// *Proceedings of the 2nd International Conference on Future Computer and Communication*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2010: 306 - 310.
- 孟李, 戴永, 陈益强. 无线局域网分布式自适应信道分配 [J]. *计算机工程*, 2011, 37(2): 103 - 105.
- JAMIESON K, BALAKRISHNAN H, TAY Y C. Sift: a MAC protocol for event-driven wireless sensor networks [EB/OL]. [2010-10-10]. <http://publications.csail.mit.edu/lcs/pubs/pdf/MIT-LCS-TR-894.pdf>.
- HALKES G P, LANGENDOEN K G. An energy-efficient MAC-protocol for dense wireless sensor networks [C]// *Proceedings of the 4th European Conference on Wireless Sensor Networks*. Berlin: Springer-Verlag, 2007: 228 - 244.
- GARDELLIN V, DAS S K, LENZINI L, *et al.* A divide-and-conquer approach for joint channel assignment and routing in multi-radio multi-channel wireless mesh networks [J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2011, 71(3): 381 - 396.
- KUMAR N, KUMAR M, PATEL R B. Capacity and interference aware link scheduling with channel assignment in wireless mesh networks [J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2011, 34(1): 30 - 38.
- 张蛟, 王万良, 姚信威, 等. 无线 Mesh 网络中混合信道分配算法研究 [J]. *计算机工程*, 2011, 37(20): 52 - 54.
- KODIALAM M, NANDAGOPAL T. Characterizing the capacity region in multi-radio multi-channel wireless mesh networks [C]// *Proceedings of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. New York: ACM Press, 2005: 73 - 87.
- ALICHERY M, BHATIA R, LI L. Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multi-radio wireless mesh networks [C]// *Proceedings of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. New York: ACM Press, 2005: 58 - 72.
- 李保罡, 刘元安, 刘凯明, 等. 多速率感知的无线多跳网络信道分配 [J]. *北京邮电大学学报*, 2012, 35(2): 82 - 85.
- KADAYIF I, KANDEMIR M, VIJAYKRISHNAN N, *et al.* An integer linear programming-based tool for wireless sensor networks [J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2005, 65(3): 247 - 260.
- HALDER S, GHOSAL A, SAHA A, *et al.* Energy-balancing and lifetime enhancement of wireless sensor network with Archimedes spiral [C]// *Proceedings of the 8th International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing*. Berlin: Springer-Verlag, 2011: 420 - 434.
- 吴文甲, 杨明, 罗军舟, 等. 干扰约束和负载均衡的无线 Mesh 网络网关部署策略 [J]. *计算机学报*, 2012, 35(5): 883 - 897.
- WANG Y, LI Y, YANG J, *et al.* Cooperation spectrum sensing for cognitive radio networks based on the bacteria foraging optimization algorithm [J]. *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, 2012, 6(4): 24 - 32.
- PRIYANTHA N B, BALAKRISHNAN H, DEMAINE E, *et al.* Anchor free distributed localization in sensor networks, #892 [R]. Massachusetts: MIT Laboratory, 2003.
- 明亮, 赵刚, 谢桂海, 等. 面向智能空间的位置感知方法研究 [J]. *软件学报*, 2009, 20(3): 671 - 681.
- 崔逊学, 刘建军, 樊秀梅. 传感器网络中一种分布式无锚点定位算法 [J]. *计算机研究与发展*, 2009, 46(3): 425 - 433.
- 罗海勇, 李锦涛, 赵方, 等. 一种基于加权多尺度分析技术的鲁棒节点定位算法 [J]. *自动化学报*, 2008, 34(3): 288 - 297.
- CHAFFARKHAH A, MOSTOFI Y. A communication-aware framework for robotic field estimation [C]// *Proceedings of the 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011: 3553 - 3558.