

基于 Vague 集的无线传感网络 QoS 路由算法研究

于鹏澎, 黄友锐, 韩 涛

(安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 在对网络中路径的能量、时延、可靠性等参数表示为 Vague 集的基础上, 提出了基于 Vague 集的多准则评价模糊决策路由选择算法。通过比较隶属度、非隶属度、Vague 集距离和贴近度值选取网络最优路径。数值计算和仿真试验表明该算法能够较好解决无线传感网络在复杂环境不确定链路多准则约束最优 QoS 路由选择问题。

关键词: 无线传感网络 (WSN); Vague 集; 最优路由; 模糊决策

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)05-0125-05

Research of the QoS Routing Algorithm for WSN Based on Vague Sets

YU Peng-peng, HUANG You-rui, HAN Tao

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In this paper, on the basis of the measurement parameters, such as energy, delay, reliability, and other factors, which are represented as vague sets, multi-criteria evaluation of fuzzy decision routing algorithm based on vague sets is proposed. By comparing the degree of membership, non-membership, Vague sets distance and similarity values, it selects the optimal network path. Numerical experiments show that the proposed algorithm can solve the multi-criteria optimal QoS routing selecting problems, which are in the uncertainty link of complex environment among wireless sensor networks.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); Vague Sets; Optimal Routing; Fuzzy Decision-making

1 引言

无线传感网络 QoS 路由已成为无线传感网络领域中一个重要的研究课题^[1]。WSN 由于应用环境的复杂性, 网络的链路特性、拓扑结构以及 QoS 需求等动态变化, 使得网络能量、时延、带宽、跳数、可靠性等 QoS 参数值具有一定的随机性和模糊性^[2], 多准则模糊决策路由成为更为复杂的问题。

经典的 Dijkstra 算法由于遍历计算的节点较多, 算法时间复杂度很高, 同时不能保证准确求得问题最优解^[3]。文献[4]中提出基于改进的模拟退火的多约束 QoS 路由选择方案, 通过控制冷却进度表提高解的质量; 文献[5]中利用蚁群优化算法, 通过寻找不同目标函数的路径, 以满足不同的 QoS 需求;

然而以上论述对无线传感网络 QoS 度量参数的模糊性未作讨论。文献[6]中在最优路径选择过程中充分考虑了 QoS 度量参数的模糊性, 但未给出属性参数和权重的模糊化处理方法。

文献[7]中定义了 Vague 集的基本运算关系, 文献[8]中定义了相似度度量方法, 本文就多准则评价模糊决策路由选择算法进行深入理论探讨。数值试验表明了该算法的有效性和实用性。

2 Vague 集基本概念及其运算

定义 1^[9] 设一非空集合 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, U 的一个 Vague 集 A 指 U 上的一对隶属函数 t_A, f_A :
 $t_A: U \rightarrow [0, 1], f_A: U \rightarrow [0, 1]$
满足 $0 \leq t_A(x) \leq 1, 0 \leq f_A(x) \leq 1$, 且 $0 \leq f_A(x)$

收稿日期: 2013-07-20; 修回日期: 2013-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274011, 51104003); 教育部新世纪优秀人才计划支持项目(NCET-10-002); 安徽省杰出青年基金项目(1108085J03)

$+t_A(x) \leq 1$, 其中 $t_A(x)$ 是 Vague 集 A 的真隶属函数, 表示支持 $x \in A$ 的证据的隶属度下界; $f_A(x)$ 是 Vague 集 A 的假隶属函数, 表示反对 $x \in A$ 的证据的隶属度下界; $h_A(x) = 1 - f_A(x) - t_A(x)$ 为 x 相对于 Vague 集 A 的 Vague 度, 刻画了 x 相对于 Vague 集 A 的犹豫程度, 其图形表示如图 1 所示.

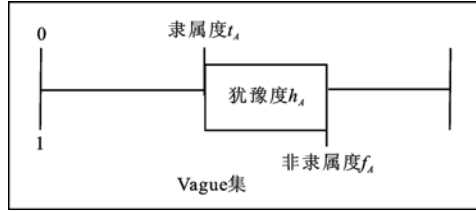


图 1 Vague 集的图形表示

设 A 为一 Vague 集, 当 U 为连续时, 有

$$A = \int_U [t_A(x), 1 - f_A(x)]/x, \quad x \in U;$$

当 U 为离散时有

$$A = \sum_{i=1}^n [t_A(x_i), 1 - f_A(x_i)]/x_i, \quad x_i \in U.$$

定义 2 若 A, B 为 U 上任意两 Vague 集, 且 $A = \langle t_A(x), 1 - f_A(x) \rangle, B = \langle t_B(x), 1 - f_B(x) \rangle$, 定义:

$$C = AB = \langle t_A(x), 1 - f_A(x) \rangle \langle t_B(x), 1 - f_B(x) \rangle = \langle t_A(x) t_B(x), (1 - f_A(x))(1 - f_B(x)) \rangle.$$

定义 3 设 $d: F(X) \times F(X) \rightarrow [0, 1]$ 是一映射. 若对任意 Vague 集 $A \in F(X), B \in F(X), C \in F(X)$, 满足下面的四条性质, 则称 $D(A, B)$ 为 Vague 集 A 与 B 的归一化距离.

性质 1 $0 \leq D(A, B) \leq 1$.

性质 2 $D(A, B) = 0$, 当且仅当 $A = B$.

性质 3 $D(A, B) = D(B, A)$.

性质 4 $D(A, B) \leq D(A, C) + D(C, B)$

本文采用闵科夫斯基——欧几里得归一化距离度量 $D(A, B)$, 其数学表述为

$$D(A, B) =$$

$$\sqrt{\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n [(t_A(x_j) - t_B(x_j))^2 + (f_A(x_j) - f_B(x_j))^2 + (h_A(x_j) - h_B(x_j))^2]}$$

(1)

3 基于 Vague 集的多准则评价模糊决策路由选择算法

3.1 无线传感网络多准则 QoS 路由网络模型

一组无线传感网络可用加权有向图 $G = (V, E)$

表示, 其中, V 是 WSN 节点集合, E 是 WSN 链路集合, 每个链路的属性集合 $O = \{o_1, o_2, \dots, o_m\}$, 包括可加性参数(时延)、可乘性参数(可靠性)、凹性参数(带宽、能量等), 与其对应的权重分别为 $w_1, w_2, \dots, w_m$, 且 $\sum_{i=1}^m w_i = 1$, 将所有属性的权重用向量表示为: $w = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}^T$. 多准则路由选择问题就是如何找到一条从源节点 s 到目标节点 t 的可行路径, 使得该条路径与理想路径的相对贴近度 p 最大, 以更好地满足 QoS 路由需求.

3.2 算法描述

步骤 1: 确定可行路径集合 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$, 属性集合 $O = \{o_1, o_2, \dots, o_m\}$ 和 Vague 集权重向量 $w = (\langle \rho_i, 1 - \tau_i \rangle)_{m \times 1}$, 属性 o_i 关于可行路径 r_j 的属性值记 a_{ij} ;

步骤 2: 模糊化处理各属性参数, 效益型参数为

$$\langle t_{ij}, 1 - f_{ij} \rangle = \langle \alpha_i \frac{a_{ij}}{a_i^{\max}}, 1 - \beta_i \frac{a_{ij}}{a_i^{\max}} \rangle \quad (2)$$

成本型参数为

$$\langle t_{ij}, 1 - f_{ij} \rangle = \langle \delta_i \frac{a_i^{\min}}{a_{ij}}, 1 - \gamma_i \frac{a_i^{\min}}{a_{ij}} \rangle \quad (3)$$

其中, $a_i^{\max} = \max_{1 \leq j \leq n} \{a_{ij}\}$, $a_i^{\min} = \min_{1 \leq j \leq n} \{a_{ij}\}$;

步骤 3: 获取 Vague 集决策矩阵 $F = (\langle t_{ij}, 1 - f_{ij} \rangle)_{m \times n}$;

步骤 4 计算加权 Vague 集决策矩阵 $\bar{F} = wF = (\langle \bar{t}_{ij}, 1 - \bar{f}_{ij} \rangle)_{m \times n}$;

步骤 5: 确定 Vague 集正、负理想解 A^+, A^- ;

步骤 6: 利用式(1) 计算方案 $r_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 与 Vague 集正、负理想解的闵科夫斯基——欧几里得归一化距离 $D(r_j, A^+), D(r_j, A^-)$;

步骤 7: 计算路径 r_j 与正理想解的相对贴近度

$$p_j = \frac{D(r_j, A^-)}{D(r_j, A^+) + D(r_j, A^-)} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

步骤 8: 依据 p_j 的不增排列顺序, 确定可行路径集 R 的优劣排序与最优路径.

4 数值计算

图 2 为一个简单的无线传感网络拓扑图. s 点、 t 点分别为源节点和目的节点, 连接两点的共有 7 条链路, 4 条可行路径, 路径集合记为: $R = \{r_1, r_2, r_3, r_4\}$, 其中路径 r_1 为 $L_1 - L_2$, 路径 r_2 为 $L_1 - L_3 - L_5$, 路径 r_3 为 $L_4 - L_5$, 路径 r_4 为 $L_6 - L_7$, 可行路径各属性值如表 1 所示.

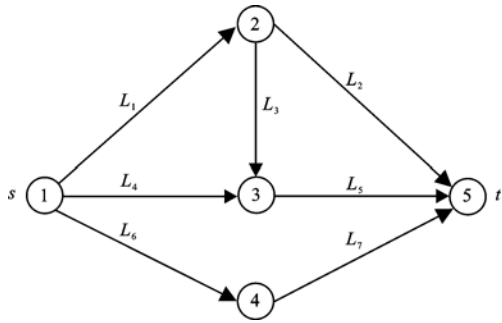


图2 无线传感网络拓扑

表1 路径的属性值

可行路径 属性值	r_1	r_2	r_3	r_4
α_1 (时延 s)	0.03	0.05	0.04	0.03
α_2 (带宽 kb/s)	12	8	10	13
α_3 (可靠性)	0.6	0.9	0.8	0.7
α_4 (剩余能量 J)	6	5	5	8

各属性的重要程度与非重要程度,由 Vague 集权重向量给出,依次为时延(delay)、带宽(bandwidth)、可靠性(rely)、剩余能量(energy):

$$w = (\langle \rho_i, \tau_i \rangle)_{4 \times 1} = (\langle 0.4, 0.55 \rangle, \langle 0.1, 0.85 \rangle, \langle 0.2, 0.75 \rangle, \langle 0.3, 0.6 \rangle)^T.$$

对成本型属性 α_1 由式(3)得

$$t_{11} = \delta_1 \frac{a_{11}^{\min}}{a_{11}} = 0.85 \times \frac{0.03}{0.03} = 0.85,$$

$$1 - f_{11} = 1 - \gamma_1 \frac{a_{11}^{\min}}{a_{11}} = 1 - 0.1 \times \frac{0.03}{0.03} = 0.9.$$

对于效益型属性 α_2 由式(2)得

$$t_{21} = \alpha_2 \frac{a_{21}}{a_{2\max}} = 0.85 \times \frac{12}{13} = 0.78,$$

$$1 - f_{11} = 1 - \beta_2 \frac{a_{21}}{a_{2\max}} = 1 - 0.1 \times \frac{12}{13} = 0.91.$$

依次类推得 Vague 集决策矩阵:

$F =$

	r_1	r_2	r_3	r_4
α_1	$\langle 0.85, 0.90 \rangle$	$\langle 0.51, 0.94 \rangle$	$\langle 0.64, 0.92 \rangle$	$\langle 0.85, 0.90 \rangle$
α_2	$\langle 0.78, 0.91 \rangle$	$\langle 0.52, 0.94 \rangle$	$\langle 0.65, 0.92 \rangle$	$\langle 0.85, 0.90 \rangle$
α_3	$\langle 0.57, 0.93 \rangle$	$\langle 0.85, 0.90 \rangle$	$\langle 0.76, 0.91 \rangle$	$\langle 0.66, 0.92 \rangle$
α_4	$\langle 0.64, 0.92 \rangle$	$\langle 0.53, 0.94 \rangle$	$\langle 0.53, 0.94 \rangle$	$\langle 0.85, 0.90 \rangle$

由定义2得

$$\bar{F} = wF =$$

$\langle 0.340, 0.495 \rangle$	$\langle 0.204, 0.517 \rangle$	$\langle 0.256, 0.506 \rangle$	$\langle 0.340, 0.495 \rangle$
$\langle 0.078, 0.773 \rangle$	$\langle 0.052, 0.799 \rangle$	$\langle 0.065, 0.782 \rangle$	$\langle 0.085, 0.765 \rangle$
$\langle 0.114, 0.697 \rangle$	$\langle 0.170, 0.675 \rangle$	$\langle 0.152, 0.682 \rangle$	$\langle 0.132, 0.690 \rangle$
$\langle 0.192, 0.552 \rangle$	$\langle 0.159, 0.564 \rangle$	$\langle 0.159, 0.564 \rangle$	$\langle 0.255, 0.540 \rangle$

由此可得 Vague 集正理想解 A^+ 和负理想解 A^- :

$$A^+ = (\langle 0.340, 0.517 \rangle, \langle 0.085, 0.799 \rangle, \langle 0.170, 0.697 \rangle, \langle 0.255, 0.564 \rangle)^T,$$

$$A^- = (\langle 0.204, 0.495 \rangle, \langle 0.052, 0.765 \rangle, \langle 0.114, 0.675 \rangle, \langle 0.159, 0.540 \rangle)^T.$$

由式(1),可计算得到路径 r_1, r_2, r_3, r_4 与 Vague 集正、负理想解的闵科夫斯基—欧几里得距离分别为

$$D(r_1, A^+) = \{[(0.34 - 0.34)^2 + (0.5050 - 0.483)^2 + (0.155 - 0.177)^2 + (0.078 - 0.085)^2 + (0.2265 - 0.201)^2 + (0.6955 - 0.714)^2 + (0.114 - 0.170)^2 + (0.3025 - 0.3025)^2 + (0.5835 - 0.5275)^2 + (0.192 - 0.255)^2 + (0.448 - 0.436)^2 + (0.36 - 0.309)^2]/2\}^{1/2} = 0.086591;$$

$$D(r_1, A^-) = \{[(0.34 - 0.204)^2 + (0.5050 - 0.5050)^2 + (0.155 - 0.291)^2 + (0.078 - 0.052)^2 + (0.2265 - 0.235)^2 + (0.6955 - 0.713)^2 + (0.114 - 0.114)^2 + (0.3025 - 0.325)^2 + (0.5835 - 0.561)^2 + (0.192 - 0.159)^2 + (0.448 - 0.46)^2 + (0.36 - 0.381)^2]/2\}^{1/2} = 0.142713.$$

依次计算可得

$$D(r_2, A^+) = 0.171196,$$

$$D(r_2, A^-) = 0.073157;$$

$$D(r_3, A^+) = 0.126372,$$

$$D(r_3, A^-) = 0.076811;$$

$$D(r_4, A^+) = 0.058583,$$

$$D(r_4, A^-) = 0.170529.$$

由式(4)可得

$$p_1 = 0.622375, p_2 = 0.299391,$$

$$p_3 = 0.378029, p_4 = 0.744304$$

因此4条可行路径的优劣排序为 r_4, r_1, r_3, r_2 , 即 r_4 为多准则约束下的最优可行路径.

通过比较表1各条路径的属性值,综合考虑各属性 Vague 集权重,最优路径的选择结果和实际情况是一致的,且具有很好的区分度.

5 仿真试验

为了评价本文提出的算法,结合数值计算实例,用 NS-2 仿真平台对该算法进行仿真试验,并与传统的经典 AODV 路由算法在传输时延、分组投递率(可靠性)、网络生存时间(剩余能量)等方面进行比较分析.仿真环境参数如下:

set val(chan)	Channel/WirelessChannel	;# 信道类型
set val(prop)	Propagation/TwoRayGround	;# 信号传播模型
set val(netif) Phy/WirelessPhy/802_15_4		
set val(mac)	Mac/802_15_4	
set val(ifq)	Queue/DropTail/PriQueue	;# 接口队列类型
set val(ll)	LL	;# 链路层类型
set val(ant)	Antenna/OmniAntenna	;# 天线模型
set val(ifqlen)	50	;# 最大队列长度
set val(nn)	50	;# 移动节点数目
set val(x)	1000	
set val(y)	1000	;# 节点移动范围
set opt(engmodel) EnergyModel		;# 能量模型
set opt(initeng)300.0000		;# 总能量
set opt(txPower)1.30		;# 传输能量
set opt(rxPower) 0.90		;# 接受能量
set opt(idlePower) 0.80		;# 待机能量

初始仿真拓扑如图 3 所示. 设置节点移动速率在 2~25 m/s 间变化, 节点发送大小为 512 B 的 CBR 数据包, 传输速率为 4packet/s. 网络中节点最大运动速度改变时, 本文提出的算法与 AODV 路由算法在传输时延、分组投递率、网络生存时间等 3 个方面的性能对比如图 4~图 6 所示.

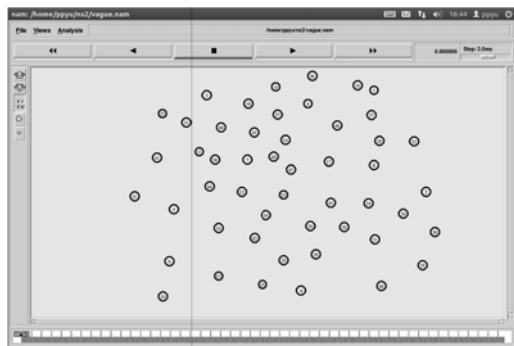


图 3 初始化网络拓扑图

由图 4 知, 两种算法的传输时延均随节点速度增加而延长, 但新算法时延比 AODV 路由算法时延小, 这是因为在路由选择过程中充分考虑了链路带宽和可靠性因素, 使得数据传输受链路断裂和传输拥塞的影响减小.

由图 5 知, 两种算法的分组投递率随节点速度增加而降低, 但新算法投递率比 AODV 算法高, 这是由于新算法在路由选择中充分考虑了链路可靠性, 使由于链路断裂而导致的丢包减少.

由图 6 知, 随着节点移动速度的增加, 网络生存时间均有提升, 这是因为随着节点移动速度的增大,

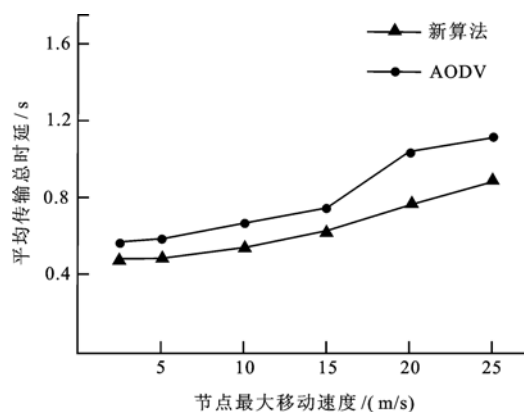


图 4 路径传输总时延比较

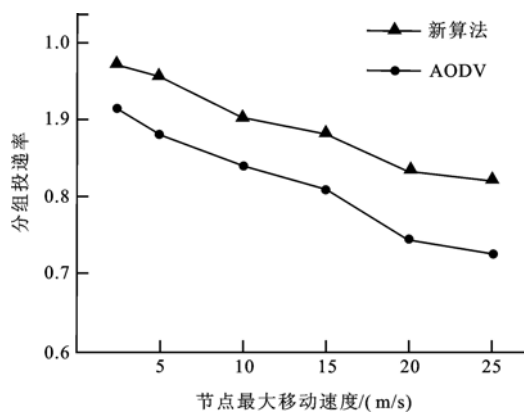


图 5 分组投递率比较

各节点数据传输趋于均衡, 在一定程度上均衡了能量消耗, 从而延长了网络生存时间. 在实验中, 新算法由于在路由中考虑了剩余能量因素, 其网络生存时间比 AODV 算法对应的生存时间长.

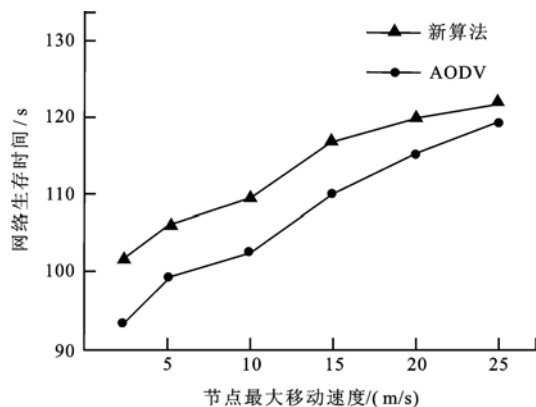


图6 网络生存时间比较

6 结束语

在无线传感网络应用中,环境的复杂性使得网络度量参数具有一定的模糊性,同时不同的应用环境对 QoS 的需求多样.本文采用的 Vague 集多准则评价模糊决策路由选择算法正是基于以上因素的考虑,通过对网络参数模糊化处理,考虑不同应用中各属性权重的模糊量,来解决路由选择中的模糊性和多准则问题.数值计算和仿真试验,证明了本文提出的算法对降低传输时延、增加分组投递率和延长网络生存时间有积极作用.

参考文献:

- [1] 唐琳, 吴际. 异构多媒体传感器网络服务质量研究

[J]. 电子与信息学报, 2013, 35 (4): 965-969.

- [2] 王小明, 卢俊岭, 李英姝, 等. 模糊随机环境下的无线传感器网络多约束多路径路由[J]. 计算机学报, 2011, 34 (5): 779-790.
- [3] 邹永贵, 魏来. 带多约束条件的最优路径选择算法研究[J]. 计算机应用, 2008, 28 (5): 1101-1103.
- [4] 刘良贵, 彭玉旭, 徐伟强, 等. 无线多媒体传感器网络中高效多约束 QoS 路径选择[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(1): 153-164.
- [5] 王镇, 刘学军. WSN 中基于蚁群算法的 QoS 路由协议[J]. 传感技术学报, 2011, 24(11): 1625-1631.
- [6] Dou Y L, Guo H X, Zhou J L. On the shortest path to solve the problem based on vague sets [C]//Fifth international conference on fuzzy systems and knowledge discovery. Shandong: IEEE Computer Society, 2008: 85-89.
- [7] 徐泽水. 直觉模糊信息集成理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 5-30.
- [8] 李登峰. 直觉模糊集决策与对策分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 6-102.
- [9] Gau W L, Buehrer D J. Vague sets[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1993, 23(2): 610-614.

作者简介:

于鹏澎 男, (1988—), 硕士研究生. 研究方向为无线传感网络信息融合技术.

(上接第 124 页)

参考文献:

- [1] Singh S, Woo M, Raghavendra C S. Power-aware routing in mobile Ad Hoc networks[C]//Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking. NY, USA: ACM, 1998: 181-190.
- [2] Toh C. Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless Ad Hoc networks [J]. Communications Magazine, 2001, 39 (6): 138-147.
- [3] Ren P, Feng J, Hu P, et al. Energy saving ad-hoc on-demand distance vector routing for mobile ad-hoc networks[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications. Presden: IEEE, 2009: 1-5.
- [4] Yu F, Li Y, Fang F, et al. A new TORA-based energy aware routing protocol in mobile Ad Hoc networks [C]//Proceedings of the 3rd IEEE/IFIP International

Conference in Central Asia on Internet, Tashkent: IEEE, 2007: 1-4.

- [5] Ding R, Muntean G. An Energy-Oriented Node Characteristics-Aware Routing Algorithm for Wireless LAN [C]//2011 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). Ireland: IEEE, 2011: 1-6.
- [6] Perrucci G P, Fitzek F H, Widmer J. Survey on energy consumption entities on the smartphone platform [C]//Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd, Yokohama: IEEE, 2011: 1-6.

作者简介:

徐方 男, (1981—), 博士生. 研究方向为无线自组网, 移动通信.

查文亮 男, (1988—), 博士生. 研究方向为无线网络、云计算.