

功率受限的无线网络的传输速率控制

李昫照¹ 丁毅¹ 刘威¹ 杨宗凯¹ 蔡文莉²

(华中科技大学湖北省智能互联网技术重点实验室 武汉 430074)¹

(中国移动集团湖北有限公司集团客户部 武汉 430023)²

摘要 无线自组织网络是没有预置基础设施支撑的自组织可重构的自治网络。由于需要克服远近效应问题、干扰问题以及提高信道的空间复用度,并且为了降低网络节点的能耗,提高网络的生存时间和系统的能量效率,网络节点的发射功率受到限制。因此,如何在功率受限的情况下保证网络数据传输性能,成为无线网络的关键问题。提出了功率受限的无线自组织网络模型,该模型用发送功率的凸函数作为度量效用的指标之一,更加贴切地反映了网络节点功率受限的特点。采用对偶分解的方法求解模型,得到分布式算法,协调节点的传输功率和数据速率,达到全网效用最大化。最后用具体的拓扑和效用函数进行仿真,验证了算法的收敛性,并考察传输速率和功率的关系对网络性能的影响。

关键词 功率受限,网络效用最大化,速率控制,对偶分解,凸优化

中图分类号 TP393.01 **文献标识码** A

Data Rate Control for Power-constrained Wireless Networks

LI Yun-zhao¹ DING Yi¹ LIU Wei¹ YANG Zong-kai¹ CAI Wen-li²

(Hubei Provincial Key Lab. of Smart Internet Tech., Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China)¹

(Department of Key Accounts, China Mobile Group Hubei Co. Ltd., Wuhan 430023, China)²

Abstract Wireless Ad-hoc network is composed by wireless nodes with the ability of sensing, data processing and wireless communications which can work in a self-organization manner. To solve Near-far effect and interference problem, to increase the spatial reuse of spectrum, and to reduce the consumed energy, increase the network lifetime, the transmission power of network nodes was constrained. How to satisfy data transmission requirement with constrained power is an important problem in wireless networks. This paper proposed a new model for power-constrained wireless ad-hoc networks. In the model, the convex function of power was taken into consideration to measure the network utility. Dual decomposition technology was adopted to solve the optimization problem. Through solving the model, a distributed power and rate control algorithm had been achieved; numerical simulation shows the convergence of the proposed algorithm, and investigates the effect of the relationship between transmission power and data rate.

Keywords Power-constrained, Network utility maximization, Rate control, Dual decomposition, Convex optimization

无线自组织网络是由一组无线终端组成,没有预置基础设施支撑的自组织可重构的自治网络。在该网络中,网络的拓扑、信道环境、业务的模式随着移动而改变,网络节点的能量、数据处理能力等都非常有限,尤其是能量的受限,决定了网络的设计须以提高系统的效率为首要目标。在无线自组织网络中,由于需要克服远近效应问题、干扰问题,以及提高信道的空间复用度,网络节点的发射功率不可避免地受到限制^[1,2];另外,为了降低网络节点的能耗,从而提高无线网络的生存时间和系统的能量效率,网络节点的发射功率也受到限制。因此,如何在功率受限的情况下保证网络数据传输性能,成为了无线网络的关键问题。

在功率受限的情况下,为了保证网络传输的性能,需要对网络能耗和数据传输进行联合优化。近年来,采用基于效用函数的优化设计成为研究网络优化问题的一个重要研究方

向。自从 Kelly 等^[3]提出非线性、凸的效用函数来度量网络中节点的性能以来,NUM(Network Utility Maximization)的思想被应用到有线和无线网络研究中^[4-7]。基于 NUM 的方法借鉴经济学中消费者接受服务所获收益的效用思想,定义网络节点对于网络服务的满意程度为效用,最为典型的效用函数为节点的发送速率^[3]。NUM 问题通常用对偶分解的方法将求解全局最优的任务转化为可以在每个节点上执行的分布式算法,因此更具应用价值。

在文献[8,9]中, Nama 等应用 NUM 来揭示效用和能量之间的关系,但其提出的效用函数仅与发送速率有关;而 Liao 等^[10]提出了将转发能量的线性叠加作为效用函数的参量,并引入松弛变量,进行对偶分解,从而获得全局的收敛,但其采用的信道容量是固定的,其效用函数并不能充分反映发送功率对网络的影响。

到稿日期:2008-06-24 本文受国家自然科学基金(60572049, 60602029, 60772088),湖北省智能互联网技术重点实验室开放基金(HSIT200605)资助。

李昫照 博士研究生,主要研究方向为无线网络频谱共享、无线网络优化等, E-mail: eliyunzhao@gmail.com.

本文提出了功率受限的无线自组织网络的 NUM 模型, 更为准确地体现了能量在网络数据传输中的关键作用。本文提出的效用函数考虑了节点传输功率受限的情况, 将节点发送功率作为自变量, 通过引入对偶变量、对原问题进行对偶分解的方法进行求解, 获得了在功率受限的情况下无线网络的传输速率控制问题的分布式解法。

1 无线自组织网络功率与传输速率的关系

在无线自组织网络进行感知和数据传输时, 出于节省能量的考虑, 节点一般采用 TDMA 的接入方式^[10]。这是因为采用其他接入方式可能导致冲突, 而为了传输成功, 则必须进行多次重传, 传输过程将消耗传感器节点相当大的能量。

假设有一个传感器节点的集合为 N 和逻辑通信链路集合为 L 的无线网络, 设当且仅当两节点可以直接通信时它们之间才存在逻辑链路。 x_s 表示从传感器节点 $s \in N$ 发出数据的速率, 显然 $x_s > 0$, 且满足 $m_s \leq x_s \leq M_s$, 其中 m_s 和 M_s 分别为传输速率的最小值和最大值。同时假设网络中每个节点发送数据是独立的, 不存在相互干扰。假设网络中链路 $l \in L$ 的信道容量记为 c_l 。 $S(l)$ 表示使用链路 l 传输数据的节点集合。对于每条链路, 其承载的传输数据的速率之和不能超过信道容量 c_l :

$$\sum_{s \in S(l)} x_s \leq c_l, \forall l \in L \quad (1)$$

在无线通信的环境下, 如果噪声为高斯白噪声, 信道容量便符合香农公式。设信道上高斯白噪声的功率谱密度为 N_0 , 带宽为 W , 发送功率为 p , d 是传输距离; α 是信道的衰减指数, 一般不小于 2; K 是跟调制方式有关的常数, 信道容量为

$$c_l(p) = W \log_2 \left(1 + \frac{pKd^{-\alpha}}{N_0W} \right) \quad (2)$$

再根据式(1), 得到关系式:

$$\sum_{s \in S(l)} x_s \leq c_l(p), \forall l \in L \quad (3)$$

这个关系式给出了功率和速率控制之间的关系, 为本文的研究提供了很重要的模型设计依据。一般而言, 无线自组织网络对网络节点的生存时间是存在一定要求的, 网络节点的生存时间一般需要不低于某一固定值 T_0 。如果考虑节点的大部分能量都消耗在无线传输上, 忽略数据处理和感知过程消耗的能量, 一个节点的总能量 E 、生存时间 T 和发送功率 p 之间存在近似的关系式: $T = E/p$, 网络节点的发送功率存在一个上限。

再根据式(1), 得到关系式:

$$p_{\max} = \frac{E}{T_0} \quad (4)$$

以上的分析主要考虑的是无线自组织网络数据传输时的功率和速率的关系, 基本反映了传感器网络能量消耗的主要方面。在此基础上, 下一节将建立无线自组织网络的效用模型。

2 功率受限的无线自组织网络建模与分析

本节提出的是无线自组织网络效用最大化模型, 此模型由优化目标和约束条件组成。在数据传输过程中, 式(3)和式(4)成为主要约束条件。

本文提出的优化问题模型为

$$\begin{aligned} & \max_{m_s \leq x_s \leq M_s, s \in N} \sum U_s(x_s, p_s) \\ & s. t. \sum_{s \in S(l)} x_s \leq c_l(p), \forall l \in L \\ & 0 \leq p_s \leq p_{\max} \end{aligned} \quad (5)$$

对于网络数据传输性能的要求, 一般采用各个节点的非线性凹函数 U_s 表示, 该函数为可导增函数。节点 s 的效用模型不仅与速率 x_s 有关, 还与自身的发送功率 p_s 有关。如果要直接求解上述问题, 除了需要调整速率 x_s , 还要调整所有为 s 做数据转发节点的速率, 这在实际网络中无法做到。因此本文采用对偶分解方法对此优化问题进行求解; 并得到全网最优的分布式算法。我们引入两组对偶变量进行求解, 一组对偶变量对求解, 另一组对 p_s 求解, 然后进行分解求解。

使用对偶分解方法来求解问题(5), 可以直接写出其拉格朗日函数:

$$L(x_s, p_l; \lambda_l, \mu_l) = \sum_s (U_s(x_s, p_s) - x_s \sum_{l \in L(s)} \lambda_l) + \sum_l \lambda_l c_l(p_l) + \sum_l \mu_l (p_{\max} - p_l) \quad (6)$$

在特殊的情况下, 自变量 (x_s, p_s) 对效用的影响可相互分离, 那么原问题的拉格朗日函数式(6)也可由两个自变量 (x_s, p_s) 分别决定的函数分开, 把本地优化问题分解为以 x_s 和 p_s 为自变量的本地优化子问题。

假设效用函数的形式为 $U_s(x_s, p_s) = f(x_s) - g(p_s)$, 其中 $f(x_s)$ 是 x_s 的凸函数, $g(p_s)$ 是 p_s 的凸函数, 两者都是二阶可导函数, 那么整个效用函数依然是凸函数, 因此对于每个源节点 s 都有本地优化问题:

$$\begin{aligned} & \max f(x_s) - \sum_{l \in L(s)} \lambda_l x_s \\ & s. t. m_s \leq x_s \leq M_s \end{aligned} \quad (7)$$

对于每条链路 l 都有本地优化问题:

$$\begin{aligned} & \max \mu_l (p_{l\max} - p_l) + \lambda_l c_l(p_l) - g(p_l) \\ & s. t. 0 \leq p_l \leq p_{l\max} \end{aligned} \quad (8)$$

优化问题(5)对于 (x_s, p_s) 并不总是可以分离的, 而且不一定是严格凸的, 而对偶函数也常常是分段可导的, 对应到其对偶问题也将是一个不可导的凸函数。对于这类问题的求解, 需要引入次梯度法来求解, 可以得到对偶算法如下:

算法 每次迭代

第一步 每个源节点更新容量价格:

$$\lambda_l(t+1) = [\lambda_l(t) - \alpha(t)(c_l(p_l) - \sum_{s \in S(l)} x_s)]^+ \quad (9)$$

容量价格可以被广播到使用链路 l 的节点上去, 节点 s 可以通过本地信息来更新代价 λ_s 。式中优化问题(5)对于 (x_s, p_s) 并不总是可以分离的, x_s 和 p_s 是问题(9)对于给定 (α, μ) 的解, $\alpha(t)$ 是迭代步长。 $[\]^+$ 表示如果括号里的数值是 R^+ 中的非负实数, 则映射结果是它本身; 如果括号中的数值小于 0, 则映射结果为 0。

第二步 每个节点以 s 下式更新其能量价格

$$\mu_s(t+1) = [\mu_s(t) - \beta(t)(p_{\max} - p_s)]^+ \quad (10)$$

能量价格同样可以被广播到使用链路 l 的节点上去, 节点 s 可以通过本地信息来更新大家容量价格 μ_s 。式中 p_s 是问题对于给定 (λ, μ) 的解, $\beta(t)$ 是迭代步长。

第三步 对于每个节点求解问题

$$\begin{aligned} & \max U_s(x_s, p_s) - x_s \sum_{l \in L(s)} \lambda_l + \lambda_s c_s(p_s) + \mu_s (p_{\max} - p_s) \\ & s. t. m_s \leq x_s \leq M_s \end{aligned} \quad (11)$$

$$p_{\max} \geq p_s \geq 0$$

在式(5)中, 自变量均是本地变量。在实际通信过程中

(λ, μ) 可以很方便获得,因此可以在各个网络节点独立求解这个问题,从而达到了分布式计算的效果。

经过对偶转化后的拉格朗日函数仍然只是分段可导的,无法直接用梯度法求解。由于次梯度方法在统计意义上可以收敛到最优解,本模型应用次梯度法进行求解。

分析与说明:

在算法中,式(11)是连续可导函数,通过求导方法可以得到对偶变量与原变量之间的关系式,因此需要证明的是价格更新迭代算法的收敛性。由于式(9)和式(10)均采用次梯度方法,而式(9)更为复杂,因此以式(9)为例加以证明。

定义 令 λ^* 为对偶变量的最优值,对于任意给定的 $\delta > 0$,如果存在一个恒定步长 α 使得

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=1}^t Q(\lambda(\tau), \mu) - Q(\lambda^*, \mu) \leq \delta \quad (12)$$

那么算法式(9)、式(10)和式(11)收敛到 λ^* 。

定理 令 λ^* 为最优价格, α 为恒定步长,如果次梯度的二范数是有界的,即存在 G 使得

$$\|c_l(p_l(t)) - \sum_{s \in S(t)} x_s(t)\|_2 \leq G \quad (13)$$

对于所有 t 都成立,那么算法式(9)、式(10)和式(11)收敛到最优半径为 $\alpha G^2/2$ 的范围之内。

证明:由式(9),可得

$$\begin{aligned} \|\lambda(t+1) - \lambda^*\|_2^2 &\leq \|\lambda(t) - \alpha(c_l(p_l(t)) - \sum_{s \in S(t)} x_s(t)) - \lambda^*\|_2^2 \\ &\leq \|\lambda(t) - \lambda^*\|_2^2 - 2\alpha(Q(\lambda(t), \mu) - Q(\lambda^*, \mu)) + \alpha^2 \|c_l(p_l(t)) - \sum_{s \in S(t)} x_s(t)\|_2^2 \\ &\leq \|\lambda(t) - \lambda^*\|_2^2 - 2\alpha \sum_{\tau=1}^t (Q(\lambda(\tau), \mu) - Q(\lambda^*, \mu)) + \alpha^2 \sum_{\tau=1}^t \|c_l(p_l(\tau)) - \sum_{s \in S(\tau)} x_s(\tau)\|_2^2 \end{aligned} \quad (14)$$

由此可知:

$$2\alpha \sum_{\tau=1}^t (Q(\lambda(\tau), \mu) - Q(\lambda^*, \mu)) \leq \|\lambda(1) - \lambda^*\|_2^2 + t\alpha^2 G^2 \quad (15)$$

由式(15)可以得到

$$\frac{1}{t} \sum_{\tau=1}^t (Q(\lambda(\tau), \mu) - Q(\lambda^*, \mu)) \leq \frac{\|\lambda(1) - \lambda^*\|_2^2 + t\alpha^2 G^2}{2t\alpha} \quad (16)$$

则有

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=1}^t Q(\lambda(\tau), \mu) - Q(\lambda^*, \mu) \leq \frac{\alpha G^2}{2} \quad (17)$$

至此,证明得证。

以上假设次梯度有界是合理的。由以上分析可以看出,当选择合适的步长时,本算法得到的收敛值可以任意地逼近最优解,可以收敛到高最优解无限接近的范围内,为本文的分析和下一节的仿真实验奠定了基础。

3 数值实验

本节在给出一个具体的效用函数和网络拓扑的情况下进行数值仿真实验。如图1所示,实验采用的无线自组织网络为直线型拓扑,包含3个感知节点 N1, N2, N3 和一个目的节点 S。

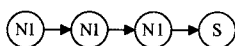


图1 基本网络拓扑

考虑到发送速率和发送功率对效用的影响,并使问题更具有通用性,采用的效用函数的形式为:

$$U_s(x_s, p_s) = a \log(x_s) - (1-\alpha) b p_s^2 \quad (18)$$

其中 $\log(x_s)$ 是 x_s 的凹函数; $b p_s^2$ 是 p_s 的凸函数, b 是一个正常数; $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$ 是权重因子,反映了通过程是偏向节能还是偏向数据传输,大的 α 表示通信偏向增加节点的发送速率,较小的 α 表明更重视节能。随着 α 值变大,传输速率增加,从而提高全网数据发送速率,而速率增加以发送功率增加为代价,从而增加能量消耗,网络生存时间也将变短。

实验采用的参数 $b=1, p_{\max}=20$, 信道参数 $k=5$, 所有迭代计算初值都是在 $[0, 1]$ 间均匀分布的随机变量,给出的发送速率和发送功率都是等效值。图2和图3给出当 $\alpha=0.5$ 时的传输速率和功率的收敛曲线。

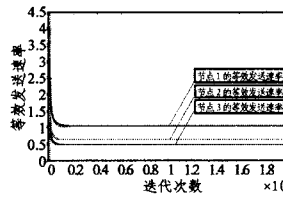


图2 $\alpha=0.5$ 时节点的等效传输速率收敛曲线

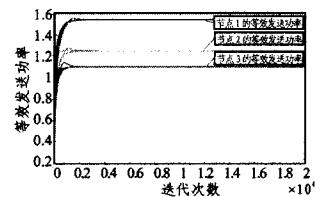


图3 $\alpha=0.5$ 时节点的等效传输功率收敛曲线

图2中 N1, N2, N3 的最优等效传输速率分别是 0.5523, 0.7623, 1.5744。

图3中 N1, N2, N3 的最优等效传输功率分别是 1.1168, 1.3007, 1.7821。

从以上的实验可以得知:算法是收敛的,而且离目的节点越近节点数据速率和功率均较大,这是因为离目的较近的节点需要转发其他节点的数据。

本节也给出当权重因子 α 在 0 到 1 之间变化的最优速率和功率变化曲线,变化范围从 0.01 开始,间隔 0.01 取点,直到 0.95。

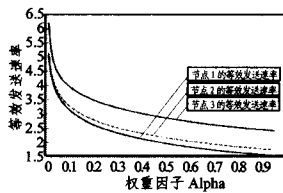


图4 最佳等效速率随权重因子的变化曲线

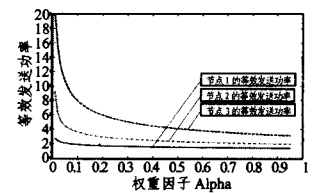


图5 最佳等效发送功率随权重因子变化曲线

图4和图5显示了节点速率和发送功率随着权重 α 的增加,节点速率和能量消耗都增加了。当发送功率较大时,势必影响网络的生存时间。因此在无线网络的研究中,需要根据需求平衡速率与传输功率的关系。

结束语 本文通过分析无线自组织网络功率受限的特性和网络效用,提出了功率受限的无线自组织网络模型。该模型考虑了无线通信信道的特性和网络节点功率受限的特点,提出的网络效用函数融合了传输速率和功率。针对提出的 NUM 模型,采用对偶分解的方法得到分布式迭代算法,进行仿真实验,验证了算法的收敛性,并且考察了传输速率和传输功率的关系对网络性能的影响。

(下转第 110 页)

客户端对流媒体的回放。通过检查序列号或时间戳是否存在陡增或骤减,可以检测是否遭受到了恶意 RTP 攻击。

6 性能分析

流媒体对时延十分敏感,所以我们主要从检测延时的角度衡量系统的性能。所谓的检测延时 D 即系统被入侵到发现系统被入侵之间的时间差。我们结合最常见的 SETUP 泛洪攻击来分析基于状态的入侵检测系统的性能。

如图 7 所示,客户端在 0 时刻发送第一个 SETUP 报文,服务器在 t_1 时刻接受到该报文,入侵检测系统初始化计数器为 1 并开启超时时间为 T 的定时器。当服务器在时间 T 内收到第 $N+1$ 个 SETUP 报文时,系统检测出发生了 SETUP 泛洪入侵。

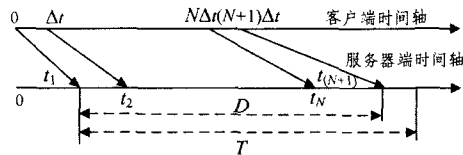


图 7 SETUP 泛洪检测模型的检测延时

检测延时 $D = t_{(N+1)} - t_1$, 假定客户端每隔 Δt 发送一个 SETUP 报文,第 i 个报文 ($i = 1, 2, \dots, N+1$) 在网络中的延时 d_i 互相独立,并且服从 $U[0, \Delta t]$ 分布,即在 $[0, \Delta t]$ 范围内服从均匀分布, $E d_i = \frac{1}{2} \Delta t$

$$t_{(N+1)} = \sum_{i=1}^{N+1} (\Delta t + d_i) = (N+1) \Delta t + \sum_{i=1}^{N+1} (d_i)$$

$$D = t_{(N+1)} - t_1 = N \Delta t + \sum_{i=2}^{N+1} (d_i)$$

检测延时 D 的期望为

$$E D = E(N \Delta t + \sum_{i=2}^{N+1} (d_i)) = N \Delta t + \sum_{i=2}^{N+1} (E d_i) = \frac{3}{2} N \Delta t$$

通常客户端允许重传的个数为 6, N 取 6, Δt 很小,通常为毫秒级,取 $\Delta t = 10\text{ms}$,所以检测延时 D 的期望的典型值为 90ms。

结束语 本文针对流媒体经常遭受的诸如 SETUP 泛洪攻击、会话截取攻击、TEARDOWN 恶意攻击、RTP 恶意攻击,建立了相应的攻击模型,在状态迁移分析和应用层会话管理技术的基础上提出了 RTSPSTAT 技术,并定量分析了其性能。

未来的工作主要是进一步丰富入侵检测模型,提高系统的实用性。

参考文献

- [1] Schulzrinne H, Lanphier R, Rao A, et al. RFC 2326, Real Time Streaming Protocol (RTSP). IETF Network Working Group, 1998
- [2] Vigna G, Eckmann S T, Kemmerer R A. The STAT tool suite [C]//DARPA Information Survivability Conference and Exposition (DISCEX '00). Proceedings. IEEE, 2000; 46-55
- [3] Vigna G, Kemmerer R. NetSTAT: A Network-based Intrusion Detection Approach [C] // Proceedings of the 14th Annual. IEEE, 1998; 25-34
- [4] Vigna G, Robertson W, Kher V, et al. A Stateful Intrusion Detection System for World-Wide Web Servers [C]//Computer Security Applications Conference, 2003. Proceedings. 19th Annual. IEEE, 2003; 34-43
- [5] Wu Y, Bagchi S, Garg S, et al. SCIDIVE: A Stateful and Cross Protocol Intrusion Detection Architecture for Voice-over-IP Environments. Dependable Systems and Networks [C]// 2004 International Conference on. IEEE, 2004; 433-442
- [6] Sengar H, Wijesekera D, Wang Haining. VOIP Intrusion Detection Through Interacting Protocol State Machines. Dependable Systems and Networks. IEEE, 2006; 393-402
- [7] Schulzrinne H, Casner S, Frederick R, et al. RFC 1889. RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. IETF Network Working Group, 1996
- [8] Gasparly L P, Sanchez R N, Antunes D W, et al. SNMP-based platform for distributed stateful intrusion detection in enterprise networks [J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal, 2005, 23(10): 1973-1982

(上接第 81 页)

参考文献

- [1] Zander J. Performance of optimum transmitter power control in cellular radio systems [J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 1992, 41
- [2] Manji S, Zhuang W. Power control and capacity analysis for a packetized indoor multimedia DS-CDMA network [J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2000, 49
- [3] Kelly F P, Maullo A, Tan D. Rate control for communication networks; shadow prices, proportional fairness and stability [J]. J. Oper. Res. Soc., 1998, 49(3): 237-252
- [4] Low S H, Lapsley D E. Optimization flow control, I; basic algorithm and convergence [J]. IEEE/ACM Transaction on Networking, 1999, 7(6): 861-875
- [5] Low S H. A duality model of tcp flow controls [C]//ITC Specialist Seminar on IP Traffic Measurement, Modeling and Management. 2000
- [6] Chen Lijun, Low S H, Chiang Mung, et al. Cross-layer congestion control, routing and scheduling design in ad hoc wireless network [C]//Proc. IEEE INFOCOM. 2006
- [7] Chiang M. Balancing supply and demand of bandwidth in wireless cellular networks; utility maximization over powers and rates [C]//Proc. IEEE INFOCOM. Hong Kong, China, March 2004
- [8] Nama H, Chiang M, Mandayam N. Utility - lifetime tradeoff in self-regulation wireless sensor networks; a cross-layer design approach [C]//IEEE ICC. 2006
- [9] Nama H, Chiang M, Mandayam N. Optimal utility-lifetime tradeoff in wireless sensor network; Characterization and distributed solutions [J]. IEEE Transaction on Wireless Communications. 2007
- [10] Liao Shengbin, Liu Wei, Ding Yi, et al. Distributed Optimization of Sensor Networks Based on NUM [C]//Glasgow, Scotland, ICC. 2007
- [11] Sadagopan N, Singh M, Krishnamachari B. Decentralized utility-based sensor network design [J]. Mobile Networks and Applications, 2006, 11: 341-350