

# 无线传感器网络中基于效用模型的 分布式功率控制机制

刘 韬

(西南民族大学计算机科学与技术学院,四川成都 610041)

**摘 要:** 本文将效用模型引入无线传感器网络的功率控制设计中,提出了一种基于效用模型的分布式功率控制机制(简称 UMDPC). 该机制建立了网络中所有传感器节点的功率与效用模型的对应关系,将链路可靠性、网络能耗归纳到统一的网络效用优化框架中,并证明该效用优化问题是凸优化问题,构造基于对偶分解的分布式的优化算法,获得网络效用最大化条件下各节点的优化发射功率. 最后,通过模拟实验对所提机制及其实现算法的性能进行比较和评价. 实验结果表明,本文所提机制最大化了网络的效用,提高了网络的能量利用效率.

**关键词:** 无线传感器网络; 效用; 功率控制

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2016)02-0301-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.02.009

## A Utility Model-Based Distributed Power Control Scheme in Wireless Sensor Networks

LIU Tao

(School of Computer Science and Technology, Southwest University for Nationalities, Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract:** In this paper, the utility model is introduced into power control of wireless sensor network and a utility model-based distributed power control scheme (abbreviated UMDPC) is presented. This scheme establishes the correspondence between the transmission power of sensor nodes and utility model, and optimizes the link reliability and energy consumption with a unified network utility optimization (NUM) framework. Then this NUM problem is proved to be a convex optimization problem. A distributed optimization algorithm is proposed to calculate the optimal transmission power of each node by using dual decomposition techniques. Finally, experiments are performed to evaluate the performance of the proposed scheme. Simulation results show that UMDPC scheme can maximize network utility and improve energy utilization efficiency.

**Key words:** wireless sensor network; utility; power control

### 1 引言

无线传感器网络(wireless sensor network)的功率控制问题是指网络中的传感器节点选择最恰当的功率发送数据,以达到优化网络性能的目的. 由于传感器网络中节点的大部分能量都消耗在通信上<sup>[1]</sup>,而功率控制技术能够减少节点通信中的能量消耗,是延长传感器网络生命周期的有效手段. 另外,节点发射功率的选择还需要综合考虑网络的连通性、误码率、吞吐量等多方面的因素,此问题的复杂程度使得这一研究面临巨大的挑战.

效用是经济学中的概念,效用最大化模型提供了一种新的资源分配方案,它结合了资源分配的效率和

公平性. Wang 与 Kar 在文献[2]中首次将效用的概念引入到无线传感器网络中,提出一种使得网络效用最大化的节点速率跨层优化框架.

本文将效用模型引入无线传感器网络的功率控制设计中,提出了一种基于效用模型的分布式功率控制机制(简称 UMDPC). 该机制以效用最大化为最终优化目标来决定各节点的优化发射功率,达到优化网络整体性能的目的.

### 2 相关工作

功率控制技术是无线传感器网络能否成功应用的核心支撑技术之一,在这方面已经有了大量的研究工

收稿日期:2014-04-08;修回日期:2015-07-05;责任编辑:蓝红杰

基金项目:中国博士后基金(No. 2013M542289);四川省科技厅科技支撑项目(No. 2014SZ0104);西南民族大学中央高校基本科研业务费专项(No. 13NZYTD02)

作,主要有以下两类:

(1) 基于统一发射功率的控制机制:网络中所有节点采用统一的优化发射功率. 比如,文献[3]中提出了 CPC 协议,其核心思想是取保证网络连通的最小发射功率值作为全网的发射功率;COMPOW<sup>[4]</sup>协议中每个节点以多个使用不同发射功率级的路由代理对网络进行探测,获得保证整个网络有效连通的最低发射功率,并以此作为全网的统一发射功率;陈友荣等人则提出了基于近邻算法的网络功率控制算法 NNPC<sup>[5]</sup>. 上述研究虽然有助于降低网络能耗,但每个节点不能自适应调整自身的发射功率,这会增加干扰,产生不必要的能耗,其结果必然不是最优的.

(2) 独立节点功率控制机制:网络中所有节点根据自身信息采用不同的优化发射功率. 文献[6]提出了独立节点级功率控制协议 BASIC,但是该协议除了能够降低节点的通信能耗,其他网络性能并没有得到改进;文献[7]与文献[8]则基于节点的发射距离来调整节点的发射功率,但是并没有考虑节点间的相互干扰以及误码等因素对通信的影响.

Kubisch 等人则在文献[9]中提出了本地平均算法 LMA,网络中的每个节点通过功率控制机制均衡各节点的单跳可达邻居数,从而优化网络拓扑结构;文献[10]则提出了一个多址干扰条件下跨层功率控制算法 CLPC,通过调节节点发数据到簇头的功率来最小化节点的能耗. 上述算法中,网络中每个节点只是利用局部信息来调整自己的发射功率,但是其功率控制效能显然不是全局最优的. 文献[11]则将节点的发射功率设置问题看做是网络中的博弈问题,并通过博弈求解过程确定节点发射功率,但这种博弈模型并未考虑节点的多跳路由过程,也没有考虑节点间的链路质量对数据转发的影响;文献[12]把无线传感器网络中数据收集和传输抽象为一个网络效用最大化问题,提出了一种迭代价格与联合节点功率控制和速率调整的分布式算法,文献[13]则针对多信道的无线网络提出了一种联合功率分配与速率控制的跨层优化算法,但是上述算法都没有考虑链路可靠性和路由对效用的影响;文献[14]提出了一种数学规划模型来研究节点发射功率控制对网络寿命及带宽需求的影响,但是该模型没有考虑噪声、节点相互干扰等因素.

本文提出了一种基于效用模型的分布式功率控制机制(UMDPC),把无线传感器网络中的数据收集与传输过程抽象为一个网络效用最大化问题,建立与链路可靠性、网络能耗相关联的网络效用优化模型,将链路可靠性、网络能耗归纳到统一的优化框架中,并通过分布式的优化算法获得网络效用最大化条件下各节点的优化发射功率. 与以前研究相比,其结果是全局最优的,而且该机制具有良好的可扩展性和可维护性.

### 3 系统模型及问题描述

#### 3.1 网络模型

整个传感器网络由一个汇聚节点(Sink)和多个传感器节点组成,我们假设网络具备如下性质:

- (1) 整个网络是连通的,节点是静止不动的;
- (2) 假设节点发送数据的路由已由相关路由算法事先确定,且中继节点不会对数据进行聚合,直接发送给下一跳节点;
- (3) 本文研究针对周期汇报型传感器网络,每个节点不断地把感应数据包发往汇聚节点,且接收节点如果收到少量错误的数据包,不要求重传;
- (4) 每个传感器节点具有相同的感应数据采集率,并具有相同的数据产生率  $r$ ;
- (5) 传感器节点的无线发射功率可控,即可以根据需要来调节自身的发射功率;
- (6) 与文献[8]一样,假设冲突已经通过空分、多包接收技术或者码分多址的方法得到解决,因此本文不考虑冲突问题.

#### 3.2 传播模型

根据电磁波在自由空间中的传播损耗模型,有下式成立:

$$P_r = P_t \left( \frac{\delta}{4\pi d} \right)^\eta G_t G_r \quad (1)$$

其中,  $P_r$  是节点的接收功率,  $P_t$  是节点的发射功率,  $\delta$  是电磁波的波长,  $d$  是传播距离,  $\eta$  是传播损耗系数,  $G_t$  与  $G_r$  分别是节点发送端与接收端的天线增益. 假设  $TR_{RX}$  为信号能够接收的最小功率门限值,则节点发送端所需的最小发射功率  $P_{\min}$  为

$$P_{\min} = \frac{TR_{RX}}{G_t G_r} \left( \frac{4\pi d}{\delta} \right)^\eta \quad (2)$$

#### 3.3 问题描述

为了使发送数据能被接收节点成功接收,除了发送节点的发射功率不小于  $P_{\min}$  外,还要尽可能降低接收节点的误码率. 以常见的采用 FSK(频移键控)调制技术的 Mica 2 型节点为例,根据文献[15],若发送节点与接收节点分别为节点  $i$  与节点  $j$ ,则链路  $ij$  的误码率(BER)  $P_e^{ij}$  为

$$P_e^{ij} = \frac{1}{2} e^{-\frac{\psi_{ij}}{B_n}} \quad (3)$$

其中,  $B_n$  是噪声带宽,  $R_{ij}$  是数据传输速率,而  $\psi_{ij}$  是接收端的信干比 SINR(信号与干扰、噪声功率比). 根据文献[16],  $\psi_{ij}$  可由公式(4)计算

$$\psi_{ij} = \frac{h_{ij} P_t^i}{\sigma_{ij}^2 + \theta \sum_{k \in F_{ij}} h_{kj} P_t^k} \quad (4)$$

其中,  $\sigma_{ij}^2$  是噪声功率,  $\theta$  是正交因子,  $F_{ij}$  是会对链路  $ij$  产生干扰的节点集合,  $P_t^i$  是节点  $i$  的发射功率,  $h_{ij}$  是链路  $ij$

的增益,可由下式计算

$$h_{ij} = \left( \frac{\delta}{4\pi d_{ij}} \right)^\eta G_t G_r \quad (5)$$

其中,  $d_{ij}$  是节点  $i$  到节点  $j$  的传播距离.

根据公式(3),为了降低误码率,发送节点需要增加发射功率来提高接收节点端的信干比,但这也加大了对其他接收节点的接收过程的干扰,降低了它们的信干比.同时,增加节点的发射功率也就增加了节点的能耗.因此,传感器网络中节点的性能指标是相互制约相互影响的,在对某个节点的性能指标进行优化的同时,可能导致其他节点的性能指标的变化.所以,把每个节点的发射功率设置问题定义为一个多约束的优化问题.

#### 4 效用模型

汇聚节点每成功接收到一个数据包将获得一定的收益  $v$ ,总的传输代价为  $c$ .若成功接收到数据包,则效用为  $v - c$ ;若汇聚节点没有收到节点发出的数据包,则效用为  $0 - c$ .假设成功收包概率为  $p$ ,则期望效用  $U$  为

$$U = p(v - c) + (1 - p)(0 - c) = pv - c \quad (6)$$

假设节点多跳路由上的节点依次为  $0, 1, \dots, n$ .其中,  $0$  为源节点,  $1, \dots, n-1$  为中继节点,  $n$  为目的节点,即汇聚节点.相邻节点  $i$  和  $i+1$  的链路成功收包率为  $p_{i,i+1}$ ,相应的传输代价为  $c_{i,i+1}$ .节点发一个数据包到汇聚节点,可以获得的效用为

$$U = \left( \prod_{j=0}^{n-1} p_{j,j+1} \right) v - \left( c_{0,1} + \sum_{i=1}^{n-1} (c_{i,i+1} \prod_{j=0}^{i-1} p_{j,j+1}) \right) \quad (7)$$

其中,链路成功收包率可以由下式计算

$$p_{i,j} = (1 - P_e^{ij})^l \quad (8)$$

$l$  为数据包长度,误码率  $P_e^{ij}$  可通过公式(3)计算.传输代价  $c_{i,j}$  等于一个数据包的传送过程中消耗的能量,包括发送节点  $i$  发送数据包的能耗与接收节点  $j$  接收数据包的能耗,可由下式计算

$$\begin{aligned} c_{i,j} &= E_{\text{send}}^i + E_{\text{receive}}^j \\ &= P_t^i \frac{l}{R_{ij}} + e^r l \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $e^r$  是节点接收 1 比特数据消耗的能量,  $R_{ij}$  为发送节点  $i$  的数据发送速率,可由下式计算

$$R_{ij} = r(1 + n_{\text{child}}^i) \quad (10)$$

$r$  表示单个节点的感应数据产生速率,  $n_{\text{child}}^i$  是节点  $i$  在路由树上的孩子节点数量,即把节点  $i$  作为中继节点的节点数量.节点  $i$  的数据发送速率等于节点  $i$  所有孩子节点和节点  $i$  自身的数据产生速率之和.

### 5 基于效用模型的分布式功率控制机制

#### 5.1 优化模型

结合公式(7)~(10),我们以节点的发射功率为自

变量,建立节点  $s$  的效用函数为

$$\begin{aligned} U_s(P_t^s) &= p_{s,1} \left( \prod_{j=1}^{n-1} p_{j,j+1} \right) v - \\ &\quad \left( c_{s,1} + \sum_{i=1}^{n-1} (c_{i,i+1} p_{s,1} \prod_{j=1}^{i-1} p_{j,j+1}) \right) \end{aligned} \quad (11)$$

其中,  $s$  为源节点,  $1, \dots, n-1$  为中继节点,  $n$  为汇聚节点;链路成功收包率  $p_{s,1}$  通过公式(8)利用  $P_t^s$  和相应干扰节点的发射功率计算,  $p_{j,j+1}$  则利用其它相应节点的发射功率计算.另外,网络优化模型还必须要满足两个约束条件:一个是节点的功率约束条件,二是链路容量约束条件,链路容量可由香农公式计算,并满足

$$W_\varphi \log_2 [1 + \psi_\varphi(P_t^s)] \geq r(1 + n_{\text{child}}^s) \quad (12)$$

$W_\varphi$  表示以节点  $s$  为发送节点的链路  $\varphi$  的带宽,  $\psi_\varphi$  表示链路  $\varphi$  的信干比.将公式(4)带入公式(12),则约束条件(12)可以转换为

$$P_t^s \geq \frac{\sigma_{sd}^2 + \theta \sum_{k \in F_{sd}} h_{kd} P_t^k}{h_{sd}} \times \left( 2^{\frac{r(1+n_{\text{child}}^s)}{W_\varphi}} - 1 \right) \quad (13)$$

其中,  $d$  为节点  $s$  第一跳的目的节点.为方便表示,我们假设

$$u_s = \frac{\sigma_{sd}^2 + \theta \sum_{k \in F_{sd}} h_{kd} P_t^k}{h_{sd}} \times \left( 2^{\frac{r(1+n_{\text{child}}^s)}{W_\varphi}} - 1 \right) \quad (14)$$

于是,结合约束条件,网络效用最大化优化模型可以表示为

$$\max \sum_{s \in N} U_s(P_t^s) \quad (15)$$

$$\text{s. t. } P_{\min}^s \leq P_t^s \leq P_t^{\max}, \forall s \in N \quad (16)$$

$$P_t^s \geq u_s, \forall s \in N \quad (17)$$

其中,  $N$  表示所有传感器节点的集合;  $P_{\min}^s$  是节点  $s$  所需要的最小发射功率,由公式(2)计算;而  $P_t^{\max}$  是节点最大发射功率.公式(16)是节点的功率约束条件,公式(17)是链路容量约束条件.

该效用优化模型把网络收益和网络总能耗这两方面的优化目标合并为一个单目标的数学优化问题,将各节点之间的相互关系以数学优化的形式表示出来,对功率进行优化分配.

#### 5.2 凸优化问题的证明

网络效用最大化问题(15~17)是一个优化问题,如果能证明它是一个凸优化问题,就可以高效计算出它的最优解.由于问题(15~17)的约束不等式为(16)和(17),它们都是优化变量的凸集.其优化变量  $P_t^s$  的取值区间可表示为  $[\max\{P_{\min}^s, \mu_s\}, P_t^{\max}]$ .为了证明该优化问题是一个凸优化问题,只需证明其目标函数(15)在优化变量  $P_t^s$  的取值区间  $[\max\{P_{\min}^s, \mu_s\}, P_t^{\max}]$  上是一个凸(凹)函数.以下为证明过程.

令  $f(P_t^s) = U_s(P_t^s)$ ,  $P_t^s$  为自变量,显然  $f(P_t^s)$  二阶可导,为了验证函数  $f(P_t^s)$  的凸性,结合公式(11),我们

对  $f(P_i^s)$  求二阶导数

$$f''(P_i^s) = \left( \left( \prod_{j=1}^{n-1} P_{j,j+1} \right) v - \sum_{i=1}^{n-1} \left( c_{i,i+1} \prod_{j=1}^{i-1} P_{j,j+1} \right) \right) P_{s,1}'' \quad (18)$$

为简化,令

$$K = \left( \prod_{j=1}^{n-1} P_{j,j+1} \right) v - \sum_{i=1}^{n-1} \left( c_{i,i+1} \prod_{j=1}^{i-1} P_{j,j+1} \right) \quad (19)$$

式(19)不包含  $P_i^s$ , 于是,式(18)可以简化为

$$f''(P_i^s) = K P_{s,1}'' \quad (20)$$

结合公式(3)、(4)、(8),式(20)可计算为

$$\begin{aligned} f''(P_i^s) &= K \left( (1 - P_e^1)^l \right)'' \\ &= \frac{1}{2} K \lg^2 e^{-g P_i^s} \left( 1 - \frac{1}{2} e^{-g P_i^s} \right)^{l-2} \left( \frac{1}{2} l e^{-g P_i^s} - 1 \right) \end{aligned} \quad (21)$$

其中,  $g$  可由下式表示

$$g = \frac{h_{s1}}{\sigma_{s1}^2 + \theta \sum_{k \in F_n} h_{k1} P_i^k} \times \frac{B_N}{2R_{s1}} \quad (22)$$

$R_{s1}$  可通过公式(10)计算. 根据公式(21), 因为  $\lg^2 e^{-g P_i^s} \left( 1 - \frac{1}{2} e^{-g P_i^s} \right)^{l-2} > 0$ , 若满足  $K > 0$ , 且  $\frac{1}{2} l e^{-g P_i^s} - 1 < 0$ , 则  $f''(P_i^s) < 0$ , 可证明  $U_s(P_i^s)$  是凹函数, 其最大值存在.

要使  $K > 0$ , 根据式(19), 可得  $v$  需满足

$$v > \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left( c_{i,i+1} \prod_{j=1}^{i-1} P_{j,j+1} \right)}{\prod_{j=1}^{n-1} P_{j,j+1}} \quad (23)$$

$v$  表示收益, 而我们仅衡量收益的相对大小, 所以我们根据公式(23)设置  $v$ , 使得  $K > 0$  成立.

要使  $\frac{1}{2} l e^{-g P_i^s} - 1 < 0$ , 则  $P_i^s$  需满足条件

$$P_i^s > \frac{1}{g} \ln \frac{l}{2} \quad (24)$$

结合  $P_i^s$  的取值区间  $[\max\{P_{\min}^s, \mu_s\}, P_i^{\max}]$ , 要使条件(24)成立, 则  $l$  需满足条件

$$l < \max\{2e^{g P_{\min}^s}, 2e^{g \mu_s}\} \quad (25)$$

当数据包长度  $l$  不满足条件(25)时, 可以恰当缩短数据包长度, 原来一个数据包可分为多个较短数据包发送, 从而使得条件(25)成立.

所以, 我们可以得出以下结论: 当收益  $v$  满足条件(23), 且数据包长度  $l$  满足条件(25)时, 效用函数  $U_s(P_i^s)$  在  $P_i^s$  的取值区间  $[\max\{P_{\min}^s, \mu_s\}, P_i^{\max}]$  上为凹函数, 由于目标函数(15)为所有节点的效用函数之和, 所以式(15)也为凹函数. 网络效用最大化问题(15~17)成为一个凸优化问题, 其凸性保证了可以高效计算出它的最优解, 实现节点功率的优化控制.

### 5.3 基于对偶分解的分布式求解算法

我们使用对偶分解法来求解网络效用最大化优化

问题(15). 首先, 引入拉格朗日乘子  $\lambda, \lambda = [\lambda_s, s = 1, \dots, |N|]^T$  放松限制条件(17), 得到拉格朗日函数:

$$\begin{aligned} L(P_i^s, \lambda) &= \sum_{s \in N} U_s(P_i^s) + \sum_{s \in N} \lambda_s (P_i^s - u_s) \\ &= \sum_{s \in N} [U_s(P_i^s) + \lambda_s (P_i^s - u_s)] \end{aligned} \quad (26)$$

其对偶函数为

$$g(\lambda) = \max L(P_i^s, \lambda), \quad (27)$$

$$\text{s. t. } P_{\min}^s \leq P_i^s \leq P_i^{\max}, \lambda \geq 0$$

则对应的对偶问题为

$$\min g(\lambda), \quad \text{s. t. } \lambda \geq 0 \quad (28)$$

#### 算法1 分布式的优化功率求解算法(UMDPC)

初始化: 设  $t=1, \lambda$  为任意非负值, 并合理设置  $v$ .

网络中每个节点  $s$  运行以下算法 ( $s=1, 2, \dots, |N|$ ):

- (1) 节点  $s$  通过公式(2)计算其到下一跳节点所需的最小发射功率  $P_{\min}^s$ , 并广播该功率值;
- (2)  $s$  接收属于其干扰节点集合的节点的发射功率广播包, 获得并更新它们的发射功率值;
- (3)  $s$  通过公式(14)计算  $\mu_s$ , 若  $\mu_s > P_i^{\max}$ , 则调整路由树, 减少该节点的孩子节点数量或降低节点的感应数据产生率  $r$ , 通知所有节点返回步骤(3);
- (4)  $s$  通过公式(8)计算此情况下自己的链路成功收包率, 并广播该值;
- (5)  $s$  接收并转发属于其路径节点集合  $N_r(s)$  的节点的链路成功收包率广播包, 获得其链路成功收包率;
- (6) 判断收益  $v$  是否满足条件(23), 若不满足则  $v = v + \Delta$  ( $\Delta$  为一较小的正常数), 并广播新的  $v$  值, 返回步骤(1);
- (7) 判断数据包长度  $l$  是否满足条件(25), 若不满足则  $l = l/2$ , 并广播新的  $l$  值, 返回步骤(1);
- (8) 节点若接收到包含新的  $v$  值或  $l$  值的广播包, 更新自己的  $v$  或  $l$  的值, 返回步骤(1);
- (9)  $s$  利用公式(11)计算效用  $U_s(P_i^s)$ , 本地解决问题(29), 获得  $P_i^{s*}(\lambda_s(t))$  并广播此功率值;
- (10)  $s$  使用公式(30)更新  $\lambda_s$ ;
- (11) 节点接收了所有节点发送  $P_i^{s*}$  的广播包后, 获得每个节点此轮迭代更新后的发送功率优化值  $P_i^{s*}$ , 此轮迭代过程结束, 并和上一轮迭代获得的各节点功率优化值  $P_i^{s*}$  比较, 若全部相等, 则满足收敛条件, 算法结束, 否则  $t = t + 1$ , 并返回步骤(3), 开始新一轮迭代过程.

对于一个确定的  $\lambda_s$ , 各子节点对应的对偶分解子问题的解为

$$\begin{aligned} P_i^{s*} &= \arg \max [U_s(P_i^s) + \lambda_s (P_i^s - u_s)], \quad (29) \\ \text{s. t. } &P_{\min}^s \leq P_i^s \leq P_i^{\max} \end{aligned}$$

问题(29)的解唯一, 对偶函数是可微函数, 我们可以使用梯度投影法求解  $\lambda$

$$\lambda_s(t+1) = [\lambda_s(t) - \alpha (P_i^s - u_s)]^+ \quad (30)$$

$t$  表示迭代次数, 迭代步长  $\alpha \geq 0$ , 且为一个充分小的数,  $[\cdot]^+$  表示在多维空间正方向上的投影. 当  $t \rightarrow \infty$

时,对偶变量  $\lambda(t)$  将会收敛到最优解  $P_i^{**}$ .

综上所述,UMDPC 机制的基于对偶分解的分布式优化功率求解算法描述如算法 1. 其中,  $N_i(s)$  表示节点  $s$  发数据到汇聚节点的路径上所有中继节点的集合.

该算法在网络初始化时运行,步骤(3)判断该节点是否存在其可行解,若  $\mu_s > P_i^{\max}$ ,说明节点的功率约束条件和链路容量约束条件无法同时满足,该节点为瓶颈节点,需要减少该节点的孩子节点数量或降低节点的感应数据产生率,以降低节点的数据发送速率;步骤(6)、(7)和(8)则利用启发式算法来调整收益  $v$  和数据包长度  $l$  的值,并且每次调整后,重启迭代过程,以确保效用最大化问题(15~17)是一个凸优化问题;算法 1 的每次迭代过程将获得一组各节点发射功率优化值,把这组值与上次迭代过程中获得的各节点发射功率优化值比较,如果两组值相等,表示各节点的优化功率值已经收敛到最优解,算法结束,若不相等则开始新一轮迭代过程.通过该算法获得的节点发射功率可使网络效用最大化.另外,该算法以分布式的方式运行,具备良好的可扩展性和可维护性.

#### 5.4 分布式算法收敛性证明

**命题 1** 原问题(15~17)目标函数的最优值与对偶问题(28)目标函数最优值相等,即无对偶间隙,强对偶成立.

**证明** 5.2 节已经证明算法 1 通过调整收益  $v$  和数据包长度  $l$  的值,问题(15~17)在其优化变量的取值区间内成为一个凸优化问题,而通过算法 1 的步骤(3),使得至少存在一个可行解满足问题(15~17)的约束条件,于是,Slater 条件成立<sup>[17]</sup>,从而原问题(15~17)与其对偶问题(28)之间无对偶间隙,对偶问题的最优解也是原问题的最优解.

根据凸优化理论<sup>[17]</sup>,当约束条件满足时,凸优化问题一定存在最优解.所以,可以基于拉格朗日对偶算法构建分布式梯度迭代算法.只要合理设置步长,该算法将会收敛到最优值<sup>[18]</sup>.同时,根据命题 1,原问题(15~17)与对偶问题之间是强对偶关系,即该最优值就是原问题(15~17)的全局最优解.

## 6 实验

利用 OPNET 作为仿真平台对 UMDPC 机制的性能进行评估与分析.仿真实验中,所有节点均匀分布在  $600\text{m} \times 600\text{m}$  的区域内,汇聚节点位于区域中心.如无特别指定,实验中的参数设置如下:数据包长度为 80bits,数据产生率  $r = 20\text{kb/s}$ ,噪声带宽  $B_N = 30\text{kHz}$ ,各节点噪声功率相等,且为  $\sigma^2 = 5 \times 10^{-10}\text{mW}$ ,  $\eta = 2$ ,  $\theta = 1/256$ ,节点的功率范围为  $[-60\text{dBm}, 0\text{dBm}]$ ,  $W_c =$

$20\text{kHz}$ ,汇聚节点成功接收一个数据包可获得的收益  $v = 1 \times 10^{-4}$ ,  $e^r = 50\text{nJ/bit}$ ,  $TR_{RX} = -100\text{dBm}$ ,电磁波波长  $\delta = 0.3\text{m}$ ,  $G_t G_r = 4$ .

#### 6.1 UMDPC 机制与固定发射功率机制比较

为了比较本文所提出的 UMDPC 机制与节点固定发射功率机制的性能,设置如图 1 所示的实验场景.其中,节点数量为 8,1 号节点为汇聚节点,虚线表示节点的路由.

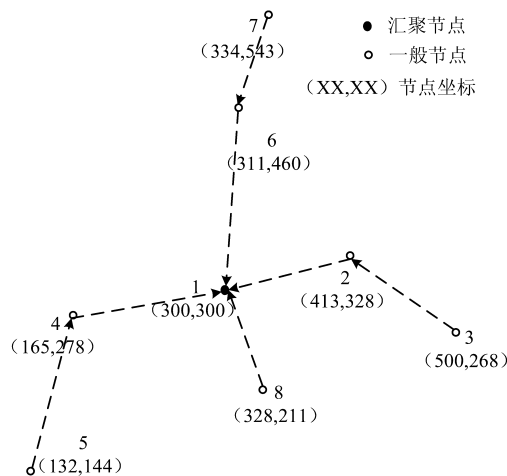


图1 实验场景1

根据 UMDPC 机制,可以获得基于实验场景 1 的各节点的优化发射功率,如图 2 所示.

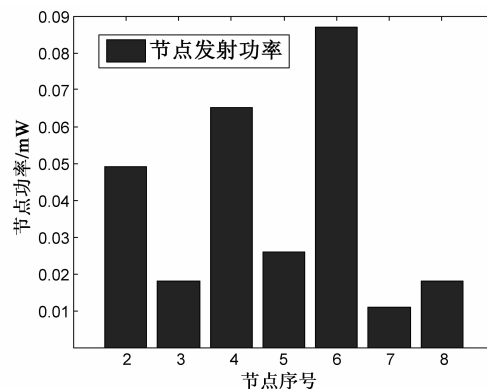


图2 基于场景1的节点优化发射功率

各节点首先采用通过 UMDPC 机制获得的优化发射功率向汇聚节点发送一定数量的感应数据包,并记录汇聚节点能够成功接收到的数据包数量以及各节点的能耗,再通过平均计算出网络效用和数据包从发送到接收的总能耗.然后所有节点依次采用  $-20\text{dBm}$ ,  $-10\text{dBm}$ ,  $0\text{dBm}$  的固定发射功率发送数据,采用同样的办法记录相关数据.图 3 显示了网络采用各机制时网络效用的对比,而图 4 则展示了各机制下节点发数据包到 Sink 的过程中产生的平均总能耗对比.从两张图对比看出,当网络效用得到提高的同时,节点发送一个数据包到达汇聚节点的总能耗却在降低,这是说明 UMDPC

机制有效提高了网络的能量利用效率.

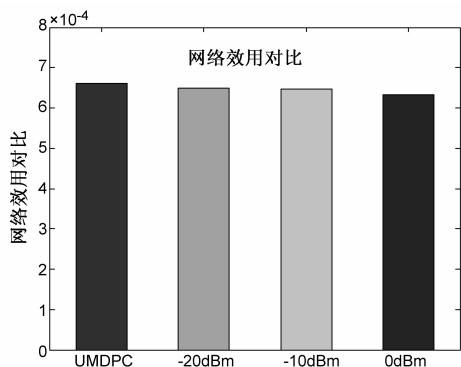


图3 比较UMDPC与固定发射功率机制的网络效用

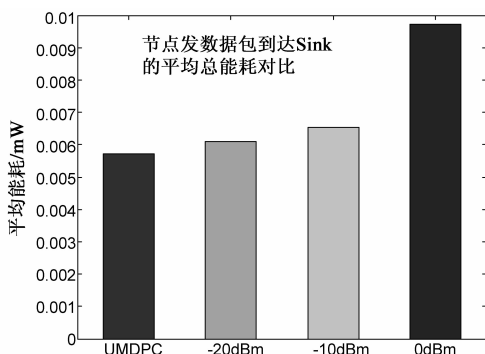


图4 比较UMDPC与固定发射功率机制下的节点能耗

## 6.2 UMDPC 机制与其它节点功率控制机制比较

我们将 UMDPC 机制与基于统一发射功率的功率控制机制 CPC 协议<sup>[3]</sup>和属于独立节点功率控制机制的 LMA 协议<sup>[9]</sup>相比较. 图 5 反映了网络分别采用上述三种机制后在不同的节点数量下的网络效用. 从图 5 中可以看出, 网络采用 UMDPC 机制时, 网络可以获得最大的网络效用, 而且随着网络规模的扩大, UMDPC 机制与其它两种机制的效用之差就越大. 这是由于 CPC 机制与 LMA 机制均是以确保网络的连通性来确定节点的发射功率, 节点与邻居节点所需的发射功率由公式(2)来确定, 但是它们没有考虑噪声、干扰, 以及误码率等因素对链路质量的影响, 所以根据 CPC 机制与 LMA 机制得出的节点发射功率会小于实际需求, 从而使网络获得的网络效用较小. 而当网络规模变大时, 节点数量增多, 相互干扰变严重, 采用 UMDPC 机制能很好均衡节点成功发包率与能耗的关系, 而另两种机制没有考虑干扰, 所以 UMDPC 机制与其它两种机制的效用之差就越大.

节点成功发包率指的是节点发送一个数据包被汇聚节点成功接收的概率, 可以通过 Sink 接收到的数据包数量除以总发送数据包数量来获得. 图 6 反映了网络采用三种节点功率控制机制在不同的节点数量下的节点平均成功发包率. 从图 6 中可以看出, 网络采用 UMDPC 机制可以获得较高的成功发包率, 而网络采用 CPC

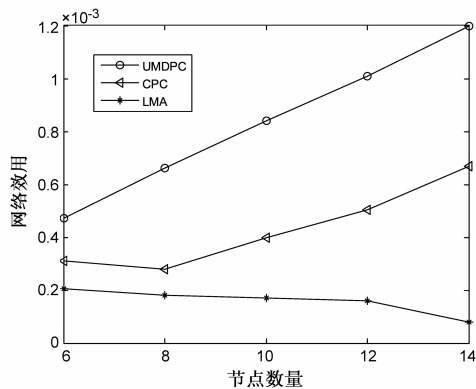


图5 不同节点数量下的网络效用比较

机制与 LMA 机制时节点成功发包率较低, 说明其误码率较高, 这是由于它们没有考虑噪声、信干比等因素.

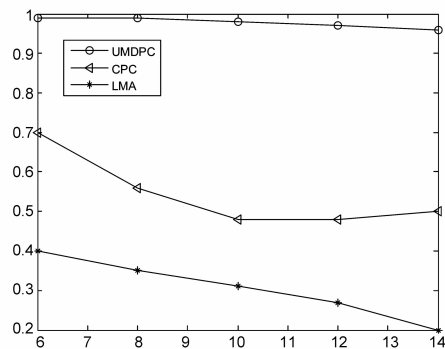


图6 不同节点数量下的成功发包率比较

能量利用效率指每消耗 1 单位能量 (mJ) 节点能够成功发送到汇聚节点的数据包数量, 可以根据实验中汇聚节点成功接收到的数据包数量和节点的平均能耗来计算. 图 7 反映了不同节点数量下网络采用三种节点功率控制机制时的平均能量利用效率. 从图 7 可以看出, 与 CPC 与 LMA 机制相比, 网络采用 UMDPC 机制时, 可以获得最高的能量利用效率. 这是因为 UMDPC 机制从全局角度考虑节点相互干扰、噪声等因素对节点成功发包率和节点能耗的影响, 优化了各节点的发射功率.

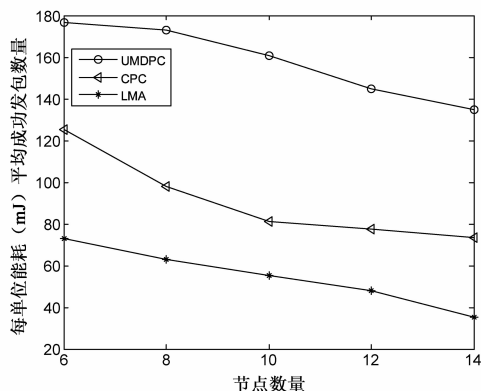


图7 不同节点数量下的能量利用效率比较

## 7 结束语

本文针对无线传感器网络,提出一种基于效用模型的分布式功率控制机制.该机制综合考虑路由、信干比和误码率等因素,建立了网络中所有传感器节点的功率与效用模型的对应关系,并通过基于对偶分解的分布式的优化算法获得网络效用最大化条件下各节点的优化发射功率.最后,实验结果表明,本文所提机制使得网络效用最大化,并提高了网络的能量利用效率.

### 参考文献

- [1] 孙利民,李建中,陈渝,朱红松.无线传感器网络[M].北京:清华大学出版社,2005.  
Sun L M, Li J Z, Chen Y, Zhu H S. Wireless Sensor Networks[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [2] X. Wang, K. Kar. Cross-layer rate control for end-to-end proportional fairness in wireless networks with random access[A]. Proc of the 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing[C]. Urbana-Champaign, Illinois, USA, 2005. 157 – 168.
- [3] Park S, Sivakumar R. Load-Sensitive transmission power control in wireless ad-hoc networks[A]. Proc of the GlobeCom 2002[C]. Taipei; IEEE, 2002. 42 – 46.
- [4] Narayanaswamy S, Kawadia V, Sreenivas RS. Power control in ad-hoc networks: Theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol[A]. Proc of the European Wireless Conf 2002[C]. Florence, 2002. 156 – 162.
- [5] 陈友荣,俞立,董齐芬,洪榛.基于近邻算法的无线传感器网络功率控制[J].浙江大学学报(工学版),2010,44(7):1321 – 1326.  
Chen Y R, Yu L, Dong Q F, Hong Z. Power control in wireless sensor network based on nearest-neighbor algorithm[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(7): 1321 – 1326. (in Chinese)
- [6] Pursley MB, Russell HB, Wysocarski JS. Energy-efficient transmission and routing protocols for wireless multiple-hop networks and spread-spectrum radios[A]. Proc of the EUROCOMM 2000[C]. Munich; IEEE, 2000. 1 – 5.
- [7] Liqing Zheng, Wensi Wang, Alan Mathewson, et al. An adaptive transmission power control method for wireless sensor networks[A]. Signals and Systems Conference[C]. UCC, Cork, 2010. 261 – 265.
- [8] 曾志文,陈志刚,刘安丰.无线传感器网络中基于可调发射功率的能量空洞避免[J].计算机学报,2010,33(1):12 – 22.  
ZENG Z W, CHEN Z G, LIU A F. Energy-hole avoidance for WSN based on adjust transmission power[J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(1): 12 – 22. (in Chinese)
- [9] Kubisch M, Karl H, Wolisz A, Zhong LZC, Rabaey J. Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks[A]. Proc of the WCNC 2003[C]. New Orleans; IEEE Communications Society, 2003. 558 – 563.
- [10] G G Messier, J A Hartwell, R J Davies. A sensor network cross-layer power control algorithm that incorporates multiple-access interference [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2008, 7(8): 2877 – 2883.
- [11] R Valli, A Sharmila, P Dananjayan. Utility based power control with pricing using MIDRS codes in wireless sensor networks[A]. International Symposium on Humanities, Science & Engineering Research (SHUSER)[C]. Kuala Lumpur, 2011. 84 – 88.
- [12] 廖盛斌,杨宗凯,等.无线传感器网络中联合功率控制和速率调整[J].电子学报,2008,36(10):1931 – 1937.  
LIAO S B, YANG Z K, et al. Joint power control and rate adaptation for wireless sensor network[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(10): 1931 – 1937. (in Chinese)
- [13] 李可维,涂来,等.联合速率控制与功率分配的多信道无线网络跨层优化[J].电子学报,2009,36(6):1203 – 1209.  
Li K W, Tu L, et al. Cross layer rate control and power allocation optimization in multi-channel wireless networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 36(6): 1203 – 1209. (in Chinese)
- [14] H Cotuk, K Bicakci, B Tavli, E Uzun. The impact of transmission power control strategies on lifetime of wireless sensor networks[J]. IEEE Trans on Computers, 2014, 63(11): 2866 – 2879.
- [15] Ian F. Akyildiz, Mehmet Can Vuran. Wireless Sensor Networks[M]. John Wiley & Sons, 2010.
- [16] Shibo He, Jiming Chen, D. K. Y. Yau, Youxian Sun. Cross-layer optimization of correlated data gathering in wireless sensor networks [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 11(11), 2012: 1678 – 1691.
- [17] S Boyd, L Vandenberghe. Convex Optimization [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.
- [18] D P Bertsekas. Nonlinear Programming [M]. Belmont, Massachusetts, USA: Athena Scientific, 1999.

### 作者简介



刘 韬 男,1978 年生于重庆,工学博士(后),副教授,硕士生导师.主要研究方向为无线传感器网络.

E-mail: 21700053@swun.cn