

基于线性规划的超宽带 WSN 功率控制策略

姚进¹, 王小平¹, 王建勇¹, 杨靖²

(1. 重庆城市管理职业学院, 重庆 401331; 2. 中国电子科技集团公司第 26 研究所, 重庆 400060)

摘要: 能耗开销是无线传感器网络(WSN)性能的瓶颈问题之一, 而功率控制是解决这一问题的最有效方法。针对超宽带(UWB) WSN, 该文以实现网络功耗最小化为目标, 从跨层优化的角度提出了基于 UWB 最优功率分配策略模型; 然后, 给出了在 lexicographic max-min (LMM) 策略下的线性规划求解方法。仿真结果表明, LMM 策略可较大改善节点平均功耗和链路成功接通率。

关键词: 无线传感器网络; 超宽带; 功率控制; 线性规划; 跨层优化

中图分类号: TP 393 **文献标识码:** A

Linear Programming Based Power Control Strategy for Ultra-Wide Band Wireless Sensor Networks

YAO Jin¹, WANG Xiaoping¹, WANG Jianyong¹, YANG Jing²

(1. Chongqing City Management College, Chongqing 401331, China;

2. 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: Energy consumption is one of the key problems on the performance of wireless sensor networks (WSN) and power control is the most efficient way to work out this problem. This paper studies the ultra-wide band (UWB) based WSNs and presents a clustered global optimization power assignment model. Aimed at minimizing the network power consumption, a solving method using LP under lexicographic max-min(LMM) strategy has been developed. Simulation results show that average power consumption and the probability of activating link access can be improved by the proposed LMM strategy.

Key words: wireless sensor networks; ultra-wide band; power control; linear programming; cross-layer improving

0 引言

由于无线传感器网络(WSN)中的无线传感器节点(简称为节点)体积较小, 自身携带能量有限且在实际运用中又必须满足一定的有效寿命, 如何高效地利用传感器的有限能量, 最大限度地延长网络寿命成为一个具有挑战性的问题。因此, 功率控制技术是 WSN 能否成功应用的核心支撑技术^[1-2]。

作为一种非传统的、新颖的无线传输技术, 超宽带(UWB)技术以其优异传输特点成为 WSN 理想的物理层通信技术选择之一。工业界和学术界对基于 UWB 的 WSN 表现出极大的兴趣和关注。文献[3]研究了 UWB 无线网络中的功率分配和调度问题, 提出了一个基于冗余的功率分配策略和独占区域调度策略。但这种策略并非专为 WSN 提出, 不能较好地适应 WSN 网络环境和节点自身软硬件限制。文献[4]结合典型的 WSN 节点的传输接收模

型和实际的电池模型, 脉冲位置调制和移频键控调制为 UWB 技术的两种正交调制方法, 提出了相应的功率控制策略。但这些策略均是基于节点层次提出的, 没有考虑到整个网络的状态, 因此具有较大的局限性。文献[5]将传输层拥塞控制与功率控制结合起来考虑并归结为一个可以运用分布式迭代算法求解的优化问题。其中, 对节点功率控制是通过调节 UWB 脉冲发射功率实现的。对于采用集中式控制策略下的 UWB 认知网络, 文献[6]提出了一种以最大化所有次要用户最小速率为目标的功率控制算法。文献[7]分别分析了 leach 和 leach-c 协议下的 WSN 节点生存个数, 以及各节点能量消耗随着时间变化的趋势。

本文运用线性规划(LP)理论, 从保证网络业务(QoS)和网络稳定性出发, 在考虑 WSN 的网络结构和业务特点及 UWB 技术自身特点的基础上, 结

收稿日期: 2014-04-25

作者简介: 姚进(1982-), 男, 重庆人, 硕士, 主要从事传感器网络性能研究。E-mail: 18247482@qq.com。

合跨层优化的方法构建了簇全局最优功率分配策略模型,通过求解该模型来实现网络中传感器所有节点功耗和的最小化。本文假定网络中所有普通节点为静止的且簇头(CH)充当簇与汇聚节点之间的网关角色。

1 网络模型

1.1 网络拓扑结构

簇结构为 WSN 最常见的拓扑组成形式且由两类节点组成:

1) 汇聚节点(SN),一般为有源供电且具有较强的计算能力和较大的储存空间,并将 CH 传输的数据通过 Internet 或其他网络传送到后端数据库。

2) 能量、计算能力均有限的普通节点(负责数据的采集、预处理、传输和中继)。

1.2 线性规划目标函数

1.2.1 相关参数

1) $P_{\text{tot}}^{(i)}$ 为第 i 个节点总的平均功耗; $P_{\text{ex}}^{(i)}$ 为第 i 个节点用于接收和发送其他节点数据的平均功耗; $P_{\text{se}}^{(i)}$ 为第 i 个节点用于向 CH 发送数据的平均功耗。

2) r_{ij} 和 r_{ic} 分别为第 i 个节点与第 j 个节点和 CH 间的数据传输速率; G_0 为簇内每个节点的最大数据生成速率。

3) N_s 为每比特信息所需的脉冲或帧数; T_c 为码片时间; T_f 为帧长; N_h 为每个帧所含的码片时间个数; $P_{\text{ave}}^{(i)}$ 为第 i 个节点发送一个脉冲的平均功率。

4) η 为网络背景噪声的平均功率; h_{ij} 为第 i 个节点与第 j 个节点间的链路增益。

5) N 为一个簇内节点的数目。

1.2.2 物理层信息

1) 对于给定的网络业务,为满足其 QoS 须使得误码率(BER)小于一定阈值。接收节点 j 处的接收信号信干噪比(SINR)应满足:

$$\text{SINR}_{ij} \geq \text{SINR}_{\text{th}} \quad i=1, \dots, N \quad (1)$$

式中 SINR_{th} 为当 BER 满足业务 QoS 的最小阈值。

2) 第 i 个节点与第 j 个节点之间的无线链路功率增益为

$$h_{ij} = \alpha / d_{ij}^n \quad (2)$$

式中: $\alpha = 10^{-5}$ 为衰落系数; d_{ij} 为第 i 个节点与第 j 个节点之间的距离(由于节点在网络布设后保持静止状态,所以借助于 UWB 信号的精确测距定位能力,簇内所有节点间的距离就易获取。故本文以下

均认为节点间的距离为已知的); $n=2 \sim 4$ 为路径损耗因子。

3) 假设一个簇由 N 个节点和一个 CH 组成。假设在某一个特定的时刻该簇内节点间存在 $L(0 \leq L \leq \lfloor N/2 \rfloor, \text{其中 } \lfloor \cdot \rfloor \text{ 为向下取整运算})$ 条活跃的链路。本文只考虑 N_h (每个帧所含的码片时间个数) 为定值且 L 为最大值时的情况(由于在 WSNs 中网络业务具有较强的周期性和节点的工作周期较低,所以一般情况下处于活跃状态的链路数要远小于这个值,这样对于通常情况就保留一定的冗余),第 i ($1 \leq i \leq L$) 链路的发送节点与接收节点 j 之间通信时,接收节点 j 接收机处的 SINR 及第 k ($k \neq i$, j) 个节点与 CH 通信时,CH 接收机处的 SINR 为

$$\text{SINR}_{ij} = E_j / (\eta_j + \text{MUI}_j) = \frac{N_s^{(ij)} P_i h_{ij}}{\eta_j + (1/N_h) \sum_{l=1, l \neq j, l \neq i}^L P_l h_{lj}} \quad (3)$$

$$\text{SINR}_{ic} = E_c / (\eta_c + \text{MUI}_c) = \frac{N_s^{(ic)} P_i h_{ic}}{\eta_c + (1/N_h) \sum_{l=1}^L P_l h_{lc}} \quad (4)$$

式中 MUI 为多用户干扰。

4) 第 i 个节点与第 j 个节点通信时的发射功率为

$$P_{\text{tx}}^{(ij)} = c_{ij} r_{ij} \quad (5)$$

式中 c_{ij} 为链路 (i, j) 的无线信号功率衰减系数,且

$$c_{ij} = \phi + \beta \cdot d_{ij}^n \quad (6)$$

式中 ϕ 和 β 为两个常数(典型值分别为 $\phi = 50 \text{ nJ/b}$, $\beta = 0.0013 \text{ pJ/m}^4$)。

第 i 个节点接收机处所有接收信号功率可写作

$$P_{\text{rx}}^{(i)} = \rho \sum_{j=1, j \neq i}^N r_{ji} \quad (7)$$

式中 $\sum_{j=1, j \neq i}^N r_{ji}$ 为第 i 个节点接收到所有数据的速率和,参数 ρ 的典型值为 50 nJ/b 。

5) 第 i 个节点总的功耗为

$$P_{\text{tot}}^{(i)} = P_{\text{ex}}^{(i)} + P_{\text{se}}^{(i)} \quad (8)$$

式中: $P_{\text{ex}}^{(i)} = P_{\text{tx}}^{(ij)} + P_{\text{rx}}^{(i)}$; $P_{\text{se}}^{(i)} = c_{ic} r_{ic}$ 。

6) WSN 中节点间的数据传输速率较低(在典型运用——监测中,数据速率一般在 $10 \sim 250 \text{ kbps}$ 之间)。但为保证数据的实时性,在通常情况下节点间的通信速率不能低于一定阈值。

将式(3)、(4)代入式(1)中,则有

$$\frac{N_s^{(ij)} P_i h_{ij}}{\eta_j + (1/N_h) \sum_{l=1, l \neq j, l \neq i}^L P_l h_{lj}} \geq SINR_{th} \quad (9)$$

$$\frac{N_s^{(kc)} P_k h_{kc}}{\eta_c + (1/N_h) \sum_{l=1}^L P_l h_{lc}} \geq SINR_{th}^c \quad (10)$$

当 N_h 不变时(见图1),可通过以下两种途径来提高接收机处的 $SINR$:

- 1) 增大单个脉冲发射的峰值功率 P_{peak} 。
- 2) 增大 N_s 。

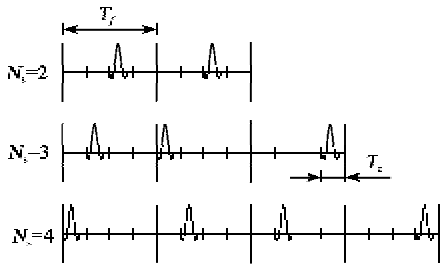


图1 TH-PPM调制模式下的UWB信号($N_h = 4$)

本文采用后者,假设 $P_{peak}^{(i)} (1 \leq i \leq N)$ 为定值 P_0 。因节点一般不具有移动性,可假定节点链路信道稳定,信号功率增益不变。则式(9)、(10)可改写为

$$N_s^{(ij)} \geq \lceil SINR_{th} \cdot \lambda_{ij}^{-1} \rceil = N_{min}^{(ij)} \quad (11)$$

$$N_s^{(kc)} \geq \lceil SINR_{th}^c \cdot \lambda_{kc}^{-1} \rceil = N_{min}^{(kc)} \quad (12)$$

其中

$$\lambda_{ij} = \frac{P_0 h_{ij}}{\eta_j + (1/N_h) \sum_{l=1, l \neq j, l \neq i}^L P_0 h_{lj}} \quad (13)$$

$$\lambda_{kc} = \frac{P_0 h_{kc}}{\eta_c + (1/N_h) \sum_{l=1}^L P_0 h_{lc}} \quad (14)$$

式中: $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整运算; λ_{ij} 和 λ_{kc} 为定值。

TH-PPM UWB 系统通信速率为

$$r_{ij} = 1/(N_s^{(ij)} N_h T_c) = \tau \psi_s^{(ij)} \quad (15)$$

式中: $\tau = 1/(N_h T_c)$; $\psi_s^{(ij)} = 1/N_s^{(ij)}$ 。

将式(15)代入 $r_{ij} \geq r_{min}$ 中可得

$$N_s^{(ij)} \leq 1/(N_h T_c r_{min}) = N_{max}^{(ij)} \quad (16)$$

那么综合式(11)、(15)、(16)可得

$$1/N_{max}^{(ij)} \leq \psi_s^{(ij)} \leq 1/N_{min}^{(ij)} \quad (17)$$

同理可得

$$1/N_{max}^{(kc)} \leq \psi_s^{(kc)} \leq 1/N_{min}^{(kc)} \quad (18)$$

1.2.3 线性规划问题

为了分析简便,本文假设每个节点最大平均数据生成速率相同且均为 G_0 ,簇内所有节点功耗和最小化问题可表示为以下线性规划问题:

$$\text{MinPow: } \min \sum_{i=1}^N P_{tot}^{(i)} \quad (19)$$

式(19)的约束条件为 $\sum_{j=1, j \neq i}^N c_{ij} r_{ij} + \rho \sum_{j=1, j \neq i}^N r_{ji} + c_{ic} r_{ic} = P_{tot}^{(i)} (1 \leq i \leq N)$; $r_{ic} + \sum_{j=1, j \neq i}^N r_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^N r_{ji} \leq G_0$; $r_{ij} \geq 0, 0 \leq P_{tot}^{(i)} \leq P_{max} (1 \leq i, j \leq N, i \neq j)$ 。

将式(15)代入式(19),并令 $\tau = K\lambda$,有

$$\text{MinPow: } \min \sum_{i=1}^N P_{tot}^{(i)} \quad (20)$$

式(20)的约束条件为 $\sum_{j=1, j \neq i}^N c_{ij} \tau \psi_s^{(ij)} + \rho \sum_{j=1, j \neq i}^N \tau \psi_s^{(ji)} + c_{ic} \tau \psi_s^{(ic)} = P_{tot}^{(i)} (1 \leq i \leq N)$; $\sum_{j=1, j \neq i}^N \tau \psi_s^{(ij)} - \sum_{j=1, j \neq i}^N \tau \psi_s^{(ji)} + \tau \psi_s^{(ic)} \leq G_0$; $1/N_{max}^{(ij)} \leq \psi_s^{(ij)} \leq 1/N_{min}^{(ij)}$, $1/N_{max}^{(kc)} \leq \psi_s^{(kc)} \leq 1/N_{min}^{(kc)}$, $0 \leq P_{tot}^{(i)} \leq P_{max} (1 \leq i, j \leq N, i \neq j)$ 。式中: $\psi_s^{(ij)}$, $\psi_s^{(kc)}$ 和 $P_{tot}^{(i)}$ 均为变量; c_{ij} , c_{ic} , ρ , τ 和 G_0 均为常数。

本文采用 LMM 策略来解决功率分配中出现的问题。

2 仿真结果

本文采用 Matlab 作为仿真平台,考虑在面积为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的目标区域内节点随机分布的网络场景,其中汇点(Sink Node)的布设位置坐标为 $(0,0)$ 。假定 UWB 信号的码片时间 $T_c = 0.2 \text{ ns}$,网络业务的误码率阈值为 10^{-6} ,每个节点处可获取的最大归一化功率为 100,节点自身数据生成速率的最大值为 200 kbps,节点的传输速率最小阈值 r_{min} 为 100 kbps。另外,本文仿真中只考虑节点间的干扰,即令网络背景噪声为 0。设 N_s 能取到的最大值为 N_{smax} 。图2、3分别绘制了采用 LMM 策略, N_s 为 N_{smax} 和 $0.5 N_{smax}$ 时的节点平均功耗和链路成功接通率。

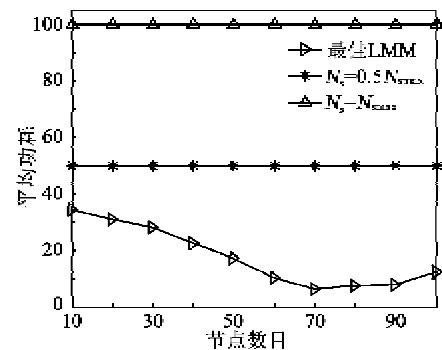


图2 平均功耗

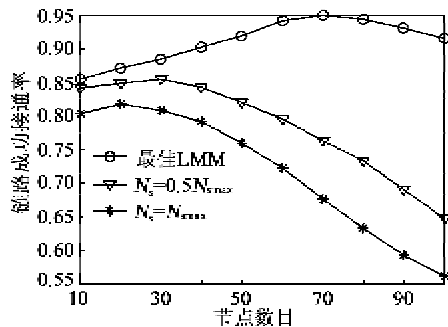


图3 链路成功接通率

由图2可知,随着节点密度的增大(节点数目小于70),LMM策略下的传感器平均功耗降低;而当节点数目超过70后,LMM策略下的节点平均功耗开始增大。这是因为节点密度越小,节点需用较大的发射功耗来抵消由于无线信道衰落带来的功耗损耗,以保证数据传输的正常进行。而当节点密度增大时,节点的功耗会相应减小。但当节点密度增加到一定时,由于节点间通信概率的增大,即节点充当中继节点的几率增加。因此扮演中继角色的节点的功耗将会随之增加。这种功耗的增加会抵消由节点密度增大带来功耗减小的效应。而当 N_s 取 N_{smax} 和 $0.5N_{smax}$ 时,节点平均功耗不会随着节点密度的增大而不发生变化,且远大于LMM优化策略下的平均功耗。

为了进一步分析LMM策略的性能,本文定义链路成功接通率为成功建立的链路数目与所有请求建立的链路数目之比。

图3给了3种情况下的链路成功接通率。当 N_s 取 N_{smax} 和 $0.5N_{smax}$ 时,链路成功接通率分别在节点数目为20和30时取得最大值。此后,随着节点数目增大,链路成功接通率开始下降并在节点数目为100时,分别下降到了56.2%和64.8%。这是由于节点密度的增大,节点间干扰随之增大,造成部分链路的接收机处的SINR达不到预设的阈值而不能接通。当节点数目从10增大到100的过程中,LMM策略下的链路成功接通率均远大于前述两种情况。另外,LMM策略下的链路成功接通率在节点数目为70时达到最大。随后开始随着节点数目的增大而下降,但下降幅度远小于前述两种情况。

这是因为LMM策略下,节点通信采用的 N_s 。根据网络状态进行了调整,使节点间干扰控制在可接受的范围内,从而减小了节点间的相互干扰并提高链路的接通率。

3 结束语

本文基于UWB物理层特点和WSNs的拓扑结构特征,并保证网络业务QoS和网络连通性的前提下,针对UWB传感器网络运用理论线性规划建立了簇全局最优功率分配策略模型,并通过求解该模型提出了LMM最优功率分配策略,以实现簇内中所有节点的功耗和最小化和延长节点的寿命。该模型的求解过程会根据节点在网络所处的位置和节点的其它信息保证网络业务数据的完整性和可靠性。仿真结果表明,在不同节点密度的网络场景中与传统的UWB功率控制策略相比,LMM策略下的节点功耗和链路成功接通率均有较大的改善,并受节点分布密度的影响较小。

参考文献:

- [1] 李方敏,徐文君,刘新华.无线传感器网络功率控制技术及其研究进展[J].软件学报,2008,19(3):716-732.
- [2] 廖盛斌,杨宗凯,程文青,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.
- [3] TANG Q, YANG L, GIANNAKIS G B, et al. Battery power efficiency of PPM and FSK in wireless sensor networks[J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2007, 6(4):1308-1319.
- [4] CAI Jun, LIU Kuanghao, SHEN Xuemin, et al. Power allocation and scheduling for ultra-wideband wireless networks[J]. IEEE Trans Veh Technol, 2008, 57(2): 1103-1112.
- [5] REENA P, JACOB L. Joint congestion and power control in UWB based wireless sensor networks[C]//S. l.: Proceedings of 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks, 2007:911-916.
- [6] GU Hongyu, YANG Chenyang. Power and admission control for UWB cognitive radio networks[C]//S. l.: Proceedings of ICC 2008, 2008:4933-4937.
- [7] 杨礼波,侯德恒.无线传感器网络功率控制技术及NS2仿[J].华北水利水电学院学报,2010,31(4):111-113.