
지연제약 무선 센서 네트워크를 위한 협력게임 기법에 기반한 전송 파워 제어 기법

변상선*

*부산가톨릭대학교

Coalitional Game Theoretic Power Control for Delay-Constrained Wireless Sensor Networks

Sang-Seon Byun*

*Catholic University of Pusan

E-mail : ssbyun@cup.ac.kr

요 약

이 논문에서 우리는 자원이 제약된 무선 센서네트워크에서 협력게임이론 (coalitional game theory) 기반의 전송파워제어 문제를 다룬다. 우리가 다루고자 하는 전송파워제어 문제는 각 센서의 에너지 효율성을 목적 함수 (objective function) 로 갖고 지연시간을 제약조건으로 갖는다. 이 문제는 two-sided one-to-one matching game 으로 모델링하고 core에 속하는 센서쌍의 매칭을 찾아내기 위해 deferred acceptance procedure (DAP)를 적용한다. Core에 속하는 매칭은 다른 센서와 매칭을 해도 현재 매칭 이상보다 좋은 결과를 가져오지 않는 매칭이 된다. 그리고, DAP를 반복해서 적용하게 되면 특정 안정상태에 도달하게 되는데, 그 안정상태에서는 지연시간제약을 만족시키면서 더 이상 에너지 효율성이 향상되지 않는 것을 보인다. 우리의 결과는 클러스터 기반의 센서 그룹방법과 지역 최적의 해 (local optimal solution)와 비교된다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a coalitional game theoretic approach to the power control problem in resource-constrained wireless sensor networks, where the objective is to enhance power efficiency of individual sensors while providing the QoS requirements. We model this problem as two-sided one-to-one matching game and deploy deferred acceptance procedure that produces a single matching in the core. Furthermore, we show that, by applying the procedure repeatedly, a certain stable state is achieved where no sensor can anticipate improvements in their power efficiency as far as all of them are subject to their own QoS constraints. We evaluate our proposal by comparing them with cluster-based and the local optimal solution obtained by maximizing the total system energy efficiency, where the objective function is non-convex.

키워드

전송파워제어, 에너지효율성, 무선센서네트워크, 협력게임이론

1. 서 론

무선네트워크에서 전송파워제어는 각각의 무선

사용자가 원하는 통신품질 (QoS)을 얻음과 동시에 다른 사용자에게 과도한 간섭을 발생시키지 않게 해주기 위해 이루어진다. 무선센서네트워크

에서는 센서들의 자원이 제약되기 때문에 전송효율성이 가장 중요한 전송과위제어의 기준이 된다. 즉, 단순히 전송가능한 데이터의 양을 최대화 시키는 것보다 단위 파워 (per Watt) 당 전송가능한 데이터의 양을 최대화 시키는 것이 더 중요하다 [1]. 그리고 동시에 무선센서네트워크의 실시간 데이터 전송 능력 또한 고려가 되어야 한다.

이 논문에서 우리는 주어진 문제를 비선형프로그램 (non-linear program)으로 모델링한다. 하지만, 주어진 문제가 non-convex 임으로 최적의 해를 합리적인 시간안에 계산할 수는 없다. 따라서, 문제의 근사적인 해를 합리적인 시간안에 구하기 위해 협력게임이론 (coalitional game theory) [2] 을 사용한다.

II. 문제정의

우리는 모든 센서가 동시에 데이터를 전송하는 환경을 고려한다. 그리고, M/M/1 큐잉모델 [3]로 데이터의 전송지연 (transmission delay) 을 모델링했을 때, 단위 파워 (Watt) 당 전송가능한 비트의 수를 최대화 시키는 문제를 아래와 같이 비선형프로그램으로 정의한다. 우선, 문제정의에 필요한 매개변수와 결정변수를 아래와 같이 정의한다.

- V : 센서들의 집합
- S : 채널 (또는 서브캐리어)의 집합
- P_i^{max} : 센서 i 가 사용할 수 있는 최대 전송파워
- T_i^{max} : 센서 i 의 전송지연 제약
- P_{is} : 채널 s 에 할당된 센서 i 의 전송파워
- r_i : 센서 i 의 전송률 (bit)

여기서, 센서 i 의 유틸리티 함수는 아래와 같이 정의한다.

$$u_i = \frac{r_i}{\sum_{s \in S} p_{is}}$$

$$r_i = B \sum_{s \in S} \log_2(1 + SINR_{is})$$

$$SINR_{is} = \frac{p_{is} G_{ik}^s}{\sum_{j \in V - \{i, k\}} p_{js} G_{jk}^s + \sigma^2}$$

위 변수들과 유틸리티 함수를 바탕으로 최적화 문제는 아래와 같이 정의된다.

Objective

$$\max_{P_i} [u_i]$$

Constraints

$$\sum_{s \in S} p_{is} \leq P_i^{max} \text{ for all } i \in V$$

$$\frac{1}{r_i/\Lambda_i - \lambda_i} \leq T_i^{max} \text{ for all } i \in V$$

$$\lambda_i \leq r_i/\Lambda_i \text{ for all } i \in V$$

첫 번째 조건은 각 센서의 전송과위에는 제약이 있음을 기술하고, 두 번째 조건은 전송지연의 제약을 정의한다. 그리고, 세 번째 조건은 각 채널의 물리적인 대역폭의 제약을 정의한다.

III. 반복협력게임

위 문제는 각 센서의 유틸리티 함수 때문에 non-convex이다. 따라서, 위 문제를 합리적인 시간안에 푸는 것은 불가능하다. 위 문제의 근사적인 해를 구하기 위해 반복협력게임 (repeated coalitional game)으로 표현한다. 다양한 협력게임 가운데, 이 문제를 반복 two-sided one-to-one matching game으로 표현하고, 최적의 해를 구하게 위해 deferred-acceptance procedure (DAP) [2] 를 적용한다.

Two-sided one-to-one matching game의 목적은 센서들이 짝을 이루어 전송과위를 제어하게 하였을 때, 짝을 이루는 두 센서 모두가 가장 최적의 결과를 얻을 수 있게 해주는 짝을 찾는 것이다. 우선, 각 센서를 아래의 사전 절차 (preliminary procedure)를 통해 owner 또는 nonowner로 분류하고, 각 센서들의 매칭 순위를 결정한다.

1. 각 센서들은 자신의 최대 전송 파워를 모든 채널에서 사용한다고 가정했을 때, 유틸리티를 계산한다.
2. 각 센서는 각 채널에 할당된 전송 파워를 일정하게 줄여나간다. 전송파워의 감소가 최적화 문제의 조건을 만족시키면서 동시에 유틸리티의 향상을 가져오면 그 센서는 owner로 분류가 되고, 조건을 만족시키지 못하거나 유틸리티가 감소되면 그 센서는 nonowner로 분류가 된다.
3. 만약, 모든 센서가 owner로 분류가 된다면, 과정 2를 반복한다.
4. 그리고, 각 owner는 각 nonowner를 대상으로 협력적인 전송과위 조절을 통해 가장 큰 유틸리티의 향상을 가져오는 순서대로 매칭 순위를 매긴다. 반대로, 각 nonowner가 각 owner를 상대로 동일한 절차를 수행한다.

위 절차대로 모든 센서들의 매칭 순위가 결정되면 아래에 기술된 DAP를 수행하여 각 센서의 전송과위를 결정한다.

1. 각 nonowner는 자신의 매칭 순위 리스트 최상위 owner에게 매칭을 제안한다. 그리고, 각 owner는 nonowner들로부터 들어온 제안 가운데 자신의 매칭 순위 최상위에 있는 nonowner로부터 들어온 제안만 받아들이고 나머지 제안은 모

두 거절한다.

2. 모든 nonowner의 제안이 받아들여지면 DAP은 종료된다. 그렇지 않으면, 두 번째 제안과정을 수행한다. 첫 번째 제안과정에서 거절당한 모든 nonowner들은 자신들의 매칭 순위 두 번째 owner들에게 제안한다. 그리고, owner들은 첫 번째 제안과정을 통해 매칭된 nonowner와 새로운 nonowner를 비교하여 새로운 nonowner가 더 높은 매칭 순위를 가지는 경우, 이 새로운 nonowner로 자신의 짝을 바꾼다.

3. 모든 nonowner-owner 짝에 더 이상 변화가 없을 때까지 과정 2를 반복한다.

위의 사전절차와 DAP는 아래에 기술한대로 최상의 매칭 결과가 얻어질 때까지 반복된다.

```

stage := 1
no_match_found := false
do {
    Perform the preliminary procedure of the
    two-sided one-to-one matching game.
    if all players are owner {
        best_stage := stage }
    Perform DAP.
    if not no_match_found{
        for each owner k that is matched with a
        nonowner {
            for all s ∈ S {
                Pks = Pks - Pks / ε
            }
        }
        stage := stage + 1
    } whilenot no_match_found
    output the power allocations at the stage
    best_stage.

```

IV. 실험결과

제안된 방법은 수치실험을 통해 평가된다. 수치실험을 위한 주요 파라미터는 아래 표 1과 같다.

표 1. 실험을 위한 주요 파라미터들

Parameter	Value
Topology	20 nodes are distributed uniformly within a 20m × 20m
Number of	40

subcarriers	
Routing	Balanced cluster-based routing [18]
Number of clusters	4
Number of each cluster number	5
B	10 KHz
s^2	0.5 mW
P^{max}	Uniformly random between 5 ~ 20 mW
T^{max}	Uniformly random between 20 ~ 100 ms
l	Poisson arrival with mean 10 packets/sec
L	Exponentially distributed packet length with an expectation of 50 bits
ϵ	100

2절에 정의된 최적화 문제의 목적 함수를 모든 센서의 전송효율의 합으로 바꾸고, DAKOTA toolkit [4]을 이용하여 지역 최적값 (local optimal)을 계산한다. 이 지역 최적값이 얻어졌을 때 각 센서의 전송효율을 이 논문에서 제안된 방법을 통해 얻어진 전송효율과 비교한다. 비교 결과는 표 2에 기술된다.

표 2. 전송효율의 비교

Sensor	Solutions by the DAP (bits/mW)	local optimal solutions (bits/mW)
0	1190.55	2108.85
1	113.06	218.50
2	109.35	211.22
3	8347.83	16921.11
4	40.40	79.73
5	5.34	10.50
6	116.92	179.54
7	114.10	11.68
8	4736613.17	1100626.92
9	177.04	15.04
10	37.40	74.59
11	27.38	368.17
12	246.54	485.04
13	12339.53	24465.07
14	4518.39	12563.72
15	2.98	35.067
16	215.64	386.99

17	85.65	254.57
18	19.58	39.41
19	338.36	602.94
Total	4764759.22	1159658.65

위 표에 기술되어 있듯이, 반복 DAP를 통해 대부분 센서에서 더 좋은 전송효율을 얻을 수 있고 모든 센서들의 전송효율의 합도 DAP을 사용했을 때 더 좋아짐을 확인할 수 있다.

V. 결 론

이 논문에서 우리는 계산자원이 제한되고 실시간 데이터 전송이 매우 중요한 무선센서네트워크 환경에서 최대 전송파워, 최대 허용 전송지연, 최대 허용 채널사용률 조건들 만족시키면서 각 센서의 전송효율을 최대화하는 문제를 고려한다.

이 문제는 비선형 프로그램으로 정의되고, 협력게임 가운데 하나인 two-sided matching game으로 모델링하여 DAP를 반복 적용하여 근사적인 해를 구할 수 있다.

수치실험을 통해, 우리는 반복 DAP가 지역 최적해보다 훨씬 좋은 결과를 가져오는 것을 확인한다.

참고문헌

- [1] F. Meshkati, H. Poor, S. Schwartz, "Energy-efficient resource allocation in wireless networks: an overview of game theoretic approaches," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 24, no. 3, pp. 58-68, May 2007.
- [2] M. Osborne, *An Introduction to Game Theory*, Oxford University Press, 2004.
- [3] M. Chiang, C. Tan, D. Palomar, D. O'Neil, D. Julian, "Power control by geometric programming," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no. 7, pp. 2640-2651, July 2007.
- [4] DAKOTA Package, Ver. 4.1, <http://www.cs.sandia.gov/DAKOTA/software.html>.