

# 무선 Ad-hoc 네트워크에서 효과적인 전력소비를 위한 브로드캐스트 알고리즘

박나리<sup>0</sup>, 이상규  
숙명여자대학교 컴퓨터학과  
{nariini<sup>0</sup>, sanglee<sup>0</sup>}@sookmyung.ac.kr

## Energy-Efficient Broadcast Algorithm in Wireless Ad-hoc Networks

Na-Ri Park<sup>0</sup>, Sang-Kyu Lee  
Dept. of Computer Science, Sookmyung Women's University

### 요 약

무선 ad-hoc 네트워크에서는 기존의 유선 네트워크와 달리 기반 시설 없이 휴대용 기기들만으로 네트워크가 형성된다. 휴대용 기기들은 배터리를 에너지원으로 사용하므로 효율적인 에너지 자원 관리가 중요한 고려 대상이 된다. 본 논문에서는 ad-hoc 무선 네트워크에서 전체 에너지를 적게 사용하는 브로드캐스트 라우팅 트리를 형성하는 알고리즘을 제안한다.

### 1. 서 론

최근에 무선 기술의 발달과 휴대용 기기의 보편화에 따라 이동 컴퓨팅 분야는 많은 관심을 받고 있다. 무선 ad-hoc 네트워크 [1, 2]는 기반 시설이 없는 곳에서 임의적으로 네트워크를 구성하고, 멀티 홉 전송을 지원하여 중간에 있는 모바일 노드들이 데이터를 전달하는 네트워크 방법이다. 각각의 노드들은 제한된 자원(전력)을 가지게 되고, 따라서 전력을 효율적으로 사용하는 것이 네트워크 구성의 중요한 문제가 된다[3, 4].

무선 ad-hoc 네트워크에서의 브로드캐스트 문제는 최근에 활발하게 연구되고 있는 주제이다[7, 5, 6, 3]. [7]번 논문에서 소개된 EWMA(Embedding Wireless Multicast Advantage)는 무선 ad-hoc 네트워크 환경에서 소스로부터의 메시지 브로드캐스트에 초점을 맞추었으며, 메시지는 소스 노드로부터 네트워크 안의 모든 노드들에게 전달되어진다. 주 목적은 소스로부터 최소 에너지 브로드캐스트 트리를 형성하는 것이다.

각각의 노드들은 전방향 안테나를 장착하고 있으며, 전송 노드의 통신 범위 안에 위치한 모든 노드들은 데이터 전송을 받을 수 있다. 그림 1은 노드  $i$ 를 포함하는 멀티캐스트 트리의 일부분이다. 노드  $i$ 는 노드  $j$ 와  $k$ 에게 데이터를 전송하게 된다. 노드  $j$ 에게 데이터를 전송하기 위해 필요한 에너지는  $e_{ij}$ , 노드  $k$ 에게 데이터를 전송하기 위해 필요한 에너지는  $e_{ik}$ 라고 두면, 노드  $i$ 는 에너지  $e_{i(j,k)} = \max\{e_{ij}, e_{ik}\}$ 로 한번 전송하므로써, 노드  $j$ 와  $k$  모두에게 데이터를 전송할 수 있다. 이러한 성질을 "wireless multicast advantage" 라고 정의하며 이는 전방향 안테나로 가능하다[6, 7].

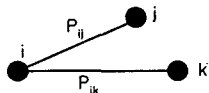


그림 1: "wireless multicast advantage"  $e_{i(j,k)} = \max\{e_{ij}, e_{ik}\}$

### 2. 네트워크 모델 및 문제 정의

본 논문에서는 노드의 위치가 고정되고 채널 상태(channel

conditions)가 바뀌지 않는 무선 네트워크에 초점을 맞추었다. 채널은 전방향 안테나가 사용되며, 어느 한 노드에 의한 모든 전송은 그 노드의 전송 범위 안에 있는 모든 노드들이 받게 된다. 이는 무선 브로드캐스트 성질(nature of wireless broadcast)에 기반 한다.

무선 ad-hoc 네트워크를 방향성이 있는 그래프  $G(V,E)$ 로 고려하였다. 이때,  $V$ 는 네트워크 안에 있는 유한한 노드들의 집합을 나타내고,  $E$ 는 노드들 사이의 방향성 있는 통신 링크( $i, j$ ) ( $i, j \in V, i \neq j$ )들의 집합을 나타낸다. 각각의 링크  $(i, j) \in E$ 는 노드  $i$ 의 에너지,  $e_{ij} \in \mathbb{R}_+$ 가 할당된다.  $V_i$ 는 노드  $i$ 의 이웃 노드들의 집합을 나타낸다. 노드  $i$ 의 최대 에너지 범위에 노드  $j$ 가 위치할 때, 노드  $j$ 는 노드  $i$ 의 이웃 노드라고 정의한다.

소스 노드는 네트워크의 다른 모든 노드들에게 브로드캐스트 메시지를 전송한다. 소스노드의 전송 범위 밖에 존재하는 노드들의 경우에는 전송 범위 안에 위치하는 노드들이 중계하여 메시지를 전달하는 다중 홉(multi-hop) 통신 방식을 갖는다.

브로드캐스트 트리에서 메시지를 전달하는 노드는 에너지를 소비한다. 본 논문에서는 무선 ad-hoc 네트워크를 이루는 각각의 노드들이 소비하는 에너지의 총합을 줄이는 브로드캐스트 트리 구성 방법을 제안한다.

### 3. 알고리즘

EWMA는 초기 트리를 구성하고, 이를 유지 하는 데에 필요한 전체 에너지를 줄이기 위해서 라우팅 경로들을 바꾸는 방법이다[7]. EWMA에서는 초기 전송 노드가 단말 노드로 바뀌는 경우가 발생한다. 즉, 전송 노드  $i$ 가 에너지를 늘려서 전송 노드  $j$ 의 자식 노드들을 모두 서비스하게 될 때, 노드  $j$ 는 단말노드가 되고, 더 이상 에너지를 갖지 않게 된다. 이때, 노드  $j$ 를 노드  $i$ 에 의해서 'exclude' 되었다고 정의한다. 또한, exclude하기 전 트리와 exclude된 후 트리의 전체 에너지의 차이를 gain이라고 표현한다. 전송 노드  $i$ 가 전송 노드  $j$ 를 exclude할 때, 노드  $i$ 는 추가의 에너지를 필요로 하는 경우가 있다. 이때, 노드  $i$ 가 갖게 되는 에너지 범위 안에 노드  $j$ 뿐만이 아니라 exclude 되는 노드들이 더 발생하게 된다. Exclude 되

어 에너지가 0이 되는 노드들이 원래 갖고 있던 에너지와 노드  $i$ 가 늘리게 되는 에너지의 차이를 gain이라고 표현한다. gain은 트리에서 exclude 할 노드를 선택하는 기준으로 사용된다.

EWMA는 초기 tree 구성에 link-based minimum spanning tree (MST)가 사용된다. 초기 트리에서 노드 번호가 작은 전송 노드부터 차례로 다른 전송 노드들을 exclude하기를 고려하고 gain값 중 가장 큰 양(+)의 gain값이 나오는 경우를 트리에 적용하여 경로를 수정한다.

브로드캐스트 트리의 전체 에너지를 감소시키기 위한 EWMA에서의 몇 가지 개선 사항들을 제안한다.

1. 노드  $i$ 가 에너지를 늘려서 노드  $j$ 를 exclude하여 줄어든 노드  $j$ 의 에너지의 값은 gain값에 적용이 되지만, 노드  $i$ 가 에너지를 늘린 범위 안에 어떤 노드  $k$ 가 있어서 노드  $j$ 에 의해 메시지를 받게 되어, 노드  $k$ 의 부모 노드가 소비하는 에너지가 줄었다면 (exclude는 아님), 줄어든 에너지의 값은 gain에 적용이 되지 않는다. 이는 exclude되는 노드의 줄어든 에너지 값만을 고려한 gain값이기 때문에 올바른 값이라 할 수 없다. 이를 exclude되는 경우 뿐만 아니라, 자신의 자식 노드가 다른 전송 노드에 의해서 서비스 된 경우의 줄어든 에너지 값도 gain값 계산에 고려하였다. 예를 들어, 그림 2-1, 2-2에서 MST에 EWMA를 적용 시킬 경우, 노드 0이 노드 1을 exclude시키기 위해 에너지를 16까지 늘린다. 이때, gain 값은 노드 1의 줄어든 에너지: 4, 노드 3의 줄어든 에너지 4, 노드 0의 늘어난 에너지 7로, gain값은 1이 된다. 이와 비슷하게, 노드 1이 전송 노드 3, 4를 exclude할 때 각각의 gain값은 0 3, 0이 된다. 세 개의 gain 중 가장 큰 값 1은, 노드 1을 exclude할 때의 값이다. 하지만 노드 3을 exclude할 때를 보면, 노드 0의 에너지가 13까지 늘어나고 이때 노드 0의 범위 안에 들어오는 노드들은 1, 4, 5, 6이며 노드 0이 이들을 서비스 하였을 때 노드 1의 에너지가 4에서 1로 줄어들게 되어 실제적인 gain값은 0에 3을 더한 3이 된다. 이처럼, EWMA는 exclude시에 발생하는 gain값 만을 고려하여 에너지가 줄어드는 경우는 gain값 계산 시에 고려되지 않아 잘못된 gain값으로 트리를 만들게 된다.

2. 노드  $i$ 가 노드  $j$ 를 exclude 할 때, 노드  $i$ 가 노드  $j$ 의 모든 자식 노드들을 서비스하기 위해 에너지를 무리하게 늘려야 하는 경우가 생긴다. 그림 3-1, 3-2를 보면 MST에서 EWMA를 적용 시킬 경우, 먼저 노드 0이 노드 1을 exclude하기 위해 에너지를 16까지 늘리기를 고려한다. 노드 1의 줄어든 에너지 10, 노드 0의 늘어난 에너지 7로, gain값은 3이 된다. 이와 비슷하게, 노드 1이 전송 노드 2를 exclude할 때의 gain값은 0 7이 된다. 가장 큰 gain값은 3으로, 노드 1을 exclude할 때의 값이다. 따라서 노드 0은 노드 1을 exclude할 정도로 에너지를 늘린다. 하지만 그림 3-3의 MR\_EWMA를 보면, 노드 0이 노드 1을 exclude하지 않고 노드 1의 에너지를 결정짓는 노드 5를 노드 0이 서비스 하게 된다. 이때, 노드 1은 에너지가 10에서 1로 줄어들게 되고, 노드 0은 9에서 13으로 에너지를 늘리게 된다. 이때의 gain값은 5이다. 이처럼, exclude 하기 위해 무리하게 에너지를 늘려야 하는 경우에는 수정한 방법이 더 좋은 결과를 가져온다.

3. EWMA는 MST에서 또는 EWMA를 적용해 나가는 과정에서 단말 노드가 되면 데이터 전송에 더 이상 참여할 수 없다. 단말 노드가 되었지만, 이후에 에너지를 가져서 데이터 전송에 참여하였을 때에 전체 에너지를 줄이는 경우가 있지만 EWMA는 이를 고려하지 않았다. 단말 노드도 에너지를 늘려서 전송 노드를

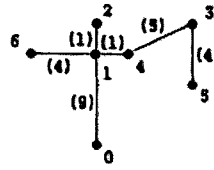


그림 2-1: MST, e=22

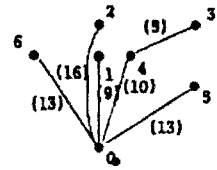


그림 2-2: EWMA, e=21

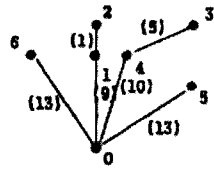


그림 2-3: MR\_EWMA, e=19

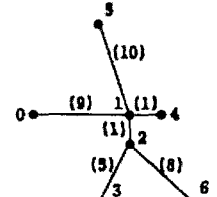


그림 3-1: MST, e=27

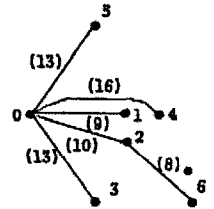


그림 3-2: EWMA, e = 24

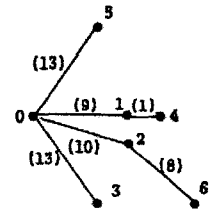


그림 3-3: MR\_EWMA, e=22

exclude할 수 있게 수정한다. 이에 관한 예제는 쉽게 찾을 수 있다.

4. EWMA는 한번 부모 노드가 결정된 노드는 다른 노드에 의해서 서비스 되는 것으로 반복될 수 없다. 예를 들어 전송 노드  $i$ 가 노드  $k$ 를 exclude하였다고 가정하면 전송 노드  $j$ ( $i < j$ )이 노드  $m$ 를 exclude하였을 때 노드  $i$ 가 아까 서비스한 노드  $k$ 와 그 자식 노드들이 노드  $j$ 의 범위 안에 들고, 그로 인해 노드  $j$ 가 서비스하는 에너지가 줄어들 수 있다고 할 지라도 노드  $i$ 번이 한번 서비스 하기로 결정된 노드는 그 이후에 어떤 노드에 의해서도 서비스 될 수 없기 때문에 그대로 노드  $j$ 번이 서비스하게 된다. 이는 반복하였을 때 노드  $i$ 가 서비스하는 에너지가 줄어들므로, 이득이 있음에도 불구하고 반복을 하지 못한다. 한번 트리에 포함되었다 하더라도, 이후에 다른 노드가 exclude 될 때 같이 포함되어 원래 부모 노드의 에너지가 줄어든다면 이후의 노드가 서비스 하도록 한다. 이러한 예제들도 쉽게 찾을 수 있다.

위의 문제점들을 개선한 알고리즘을 제시한다. MR\_EWMA()는 초기 트리에서 노드 순서대로 에너지를 줄일 것을 고려하는 부분이고, max\_remove()는 한번의 이터레이션이 끝난 후에 다시 한번 노드 순서대로 에너지를 줄일 수 있는 지를 검사하는 부분이다. 여기서,  $e[i][j]$ 는 노드  $i$ 가 노드  $j$ 에게 데이터를 전송하기 위해서 필요로 하는 에너지,  $TE[i]$ 는 노드  $i$ 가 자식 노드들을 서비스 하기 위해서 필요로 하는 에너지,  $parent[i]$ 는 노드  $i$ 의 부모 노드를 나타낸다.

```

MR_EWMA ()
for each transmitting node i
  max_gain = 0 // initialization
  for each child node m of node i
    if (e[i][m] == TE[i]) then max_child_i ← m
    /* max_child_i를 서비스 할 노드 찾기 */
  for all node j
    TE' [j] ← TE[j]
    TE[j] ← max(TE[j], e[max_child_i][j])
    delta ← TE' [j] - TE[j]
    gain ← -delta
    Parent[max_child_i] ← j
    for each node k (k ∈ Vi)
      if (TE[j] ≤ e[j][k]) then Parent[k] ← j
    for each node k (k ∈ Vi)
      TE' [k] ← TE[k]
      TE[k] ← 0
    for each node l (l ∈ Vi)
      if (Parent[l] == k && TE[k] < e[k][l]) then TE[k] ← e[k][l]
      gain ← gain + (TE' [k] - TE[k])
    if (max_gain < gain) then max_gain ← gain, slct_j = j
  if (max_gain > 0) then apply modification to tree

max_remove()
for each transmitting node i
  save_eng ← 0 // initialization
  for each child node m of node i
    if (e[i][m] == TE[i]) then frst_child ← m
  for each child node m of node i, (m ≠ frst_child)
    snd_child ← max(snd_child, m)
  for all node j
    add_eng ← max(TE[j], e[j][frst_child]) □ TE[j]
    red_eng ← TE[i] □ e[i][snd_child]
    if (red_eng □ add_eng > 0 && save_eng < red_eng □ add_eng)
      then save_eng ← red_eng □ add_eng
         slct_node ← j
         slct_node_eng ← add_eng
    TE[slct_node] ← TE[slct_node] + slct_node_eng
    TE[i] ← e[i][snd_child]
    
```

4. 성능 평가

본 논문에서 제시한 알고리즘과 EWMA, BIP, MST의 성능을 비교하였다. 기존의 논문과 동일한 조건으로 실행하였다[6, 7]. 7x7 사각형의 단위 지역에 노드들이 임의로 위치해 있고(실수 좌표), 노드의 개수는 각각 10, 30, 60, 100개로 두었다. 같은 크기의 지역에 노드들이 위치하므로, 노드의 개수가 많을수록 노드의 밀도는 높아진다. 노드의 최대 전송 범위는 각각의 노드가 모든 노드에게 데이터를 전송할 수 있을 정도로 지정한다. 어떤 두 노드 사이의 전송 에너지는  $d^\alpha$ 를 사용하였다. 이때,  $d$ 는 두 노드 사이의 거리를 나타내고,  $\alpha$ 는 전송 손실 지수로 값은 2,3,4를 각각 적용하였다. 시뮬레이션은 100번씩 실행하였다.

10개 노드 네트워크				
$\alpha$	MST	BIP	EWMA	MR_EWMA
2	1.2624; 0.0398	1.2140; 0.0314	1.0982; 0.0184	1.0041; 0.0004
3	1.1742; 0.0307	1.1079; 0.0178	1.0651; 0.0138	1.0092; 0.0015
4	1.0938; 0.0192	1.0378; 0.0038	1.0512; 0.0111	1.0043; 0.0005
50개 노드 네트워크				
$\alpha$	MST	BIP	EWMA	MR_EWMA
2	1.2288; 0.0090	1.1558; 0.0091	1.0672; 0.0042	1.0094; 0.0006
3	1.1148; 0.0033	1.0731; 0.0023	1.0566; 0.0018	1.0031; 0.0001
4	1.0802; 0.0035	1.0487; 0.0020	1.0467; 0.0027	1.0017; 0.0006

표 1: 노드 개수 10, 50개와  $\alpha = 2, 3, 4$ 에서 100번 실행 시, 정규화 트리 에너지의 평균과 분산 값.

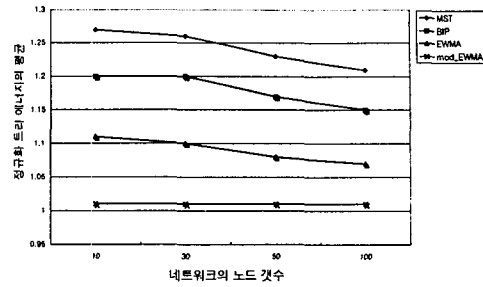


그림 4: 노드 개수 10, 30, 60, 100개에 대한  $\alpha = 2$ 의 정규화 트리 에너지 평균값

표1과 그림 4는 브로드캐스트 트리의 전체 에너지 값을 트리 에너지로 나타내었다[6, 7].  $Q_i(m)$ 은  $m(100가지)번째$  네트워크 구성에서  $i(i = \{MR\_EWMA, EWMA, BIP, MST\})$ 번째 알고리즘으로 브로드캐스트 트리를 구성하였을 때 전체 파워를 나타낸다.  $Q_{best}(m)$ 은  $m번째$  네트워크 구성에서의 모든  $i$ 개의 브로드캐스트 트리 중 가장 적은 파워를 내는 트리의 전체 파워를 나타낸다.  $m번째$  네트워크 구성에서  $i번째$  알고리즘으로 트리를 구성하였을 때의 정규화 트리 에너지는  $Q'_i(m) = Q_i(m)/Q_{best}(m)$ 으로 나타낸다.

5. 결론

본 논문에서는 무선 ad-hoc 네트워크에서 하나의 소스 노드가 네트워크 내의 다른 모든 노드들에게 데이터를 전송하기 위하여 브로드캐스트 트리를 구성할 때, 트리를 유지하기 위하여 드는 에너지의 전체 에너지를 줄이는 알고리즘을 제안하였다. 이는 기존의 연구인 BIP이나 EWMA보다 더 나은 결과를 보여 준다.

참고 문헌

- [1] Charles E. Perkins, Ad Hoc Networking. Addison-Wesley
- [2] Toh, C.K., Ad hoc mobile wireless networks: protocols and systems. Prentice Hall PTR
- [3] S. Singh, C. Raghavendra, and J. Stepanek. Power-aware broadcasting in mobile ad hoc networks. In Proceedings of IEEE PIMRC' 99, Osaka, Japan, September 1999
- [4] J. E. Wieselthier, G. D. Nguyen, and A. Ephremides. Algorithms for energy-efficient multicasting in static ad hoc wireless networks. ACM Mobile Networks and Applications (NONET), 6(3):251-263, June 2001
- [5] P.-J. Wan, G. Calinescu, and O. F. X.-Y. Li. Minimum-energy broadcast routing in static ad hoc wireless network. In Proceedings of IEEE INFOCOM 2001, Anchorage, Alaska, April 2001.
- [6] J. E. Wieselthier, G. D. Nguyen, and A. Ephremides. On the construction of energy-efficient broadcast and multicast trees in wireless networks. In IEEE INFOCOM 2000, pages 586-594, Tel Aviv, Israel, 2000
- [7] Mario Cagalj, Jean-Pierre Hubaux, Christian Enz. Minimum-energy broadcast in all-wireless networks: NP-completeness and distribution issues. MOBICOM'02, September 23-26, 2002, Atlanta, Georgia, USA