

Hitch-hiking기법과 Coverage sequence 조정을 통한 에너지 효율적인 무선 애드 혹 네트워크 브로드캐스트 알고리즘¹⁾

전상현^{0*} 장형수* 조준호**

서강대학교 컴퓨터학과, 포항공과대학교 전자전기공학부
{shjeon^{0*}, hschang*}@smolab.sogang.ac.kr, {jcho**@postech.ac.kr}

Broadcast by iterative Coverage sequence Adjustment with Hitch-hiking in wireless ad hoc network

Sang-hyun Jeon^{0*}, Hyeong Soo Chang* Joon Ho Cho**
^{*}Department of Computer Science, Sogang University

^{**}Department of Electronic and Electrical Engineering, POSTECH

요약

본 논문에서는 정적인(static) 무선 애드 혹 네트워크상에서 에너지 효율적으로 broadcast하는 문제에 대한 새로운 "Broadcast by iterative Coverage sequence Adjustment with Hitch-hiking (BCAH)" 알고리즘을 제안한다. BCAH는 에너지 효율적인 broadcast 알고리즘 중 가장 대표적인 Broadcast Incremental Power(BIP)와 같은 시간 복잡도를 가지면서 BIP에 비해 적은 에너지를 소모해 broadcast를 수행한다. 또한 BCAH는 각 노드의 인접한 노드들의 정보만을 이용해 동작하기 때문에 노드들의 이동성을 고려한 동적인 네트워크에 좋은 확장성을 가진다.

1. 서론

본 논문에서는 정적인 무선 애드 혹 네트워크(wireless ad hoc network) 상에서 특정 정보를 갖고 있는 소스 노드가 정보를 네트워크상의 다른 모든 노드에 전달하는 broadcast 문제를 해결하기 위하여 빠른 시간 내에 적은 에너지를 사용해 에너지 효율적인 broadcast를 수행하는 "Broadcast by iterative Coverage sequence Adjustment with Hitch-hiking(BCAH)" 알고리즘을 제안한다. 에너지 효율성에 대한 문제를 고려한 알고리즘은 크게 (deterministic) greedy 알고리즘과 stochastic search 알고리즘으로 나눌 수 있다. Greedy 알고리즘들 중 가장 대표적인 Broadcast Incremental Power(BIP)[1]는 Prim's minimum-spanning-tree(MST) 알고리즘에 기반을 둔 알고리즘으로서 빠르게 broadcast 트리를 구성할 수 있다. Wireless Multicast with Hitch-hiking(WMH)[2]은, BIP의 프로토타입 접근법에서 벗어나, hitch-hiking 기법을 이용한 데이터 링크 층과 네트워크 층간의 다층 간(cross-layer) 최적화 방법을 이용해 BIP에 비하여 약 50%의 성능향상을 이루었다[2]. BIP에 hitch-hiking 기법을 적용한 알고리즘(Broadcast with Hitch-Hiking(BHH))[3]도 연구되었는데 BHH는 BIP의 장점과 Hitch-hiking 기법의 장점을 함께 이용해 WMH보다 10~20% 적은 에너지로 broadcast할 수 있음을 보였다[3].

Stochastic search 알고리즘은 Ant Colony Optimization(ACO)[4], Viability Lemma[5], Random Tree Optimization(RTO)[6] 등을 이용한 broadcast 알고리즘들이 있다. 이와 같은 stochastic search 알고리즘들은 대체로 다음과 같이 동작한다. (a) 후보해를 생성하기 위한 확률적인 구조(stochastic structure)를 초기화한다. (b) 확률적인 구조를 이용해 하나 또는 여러 개의 후보해를 생성한다. (c) 후보해 중 가장 성능이 좋은 해를 이용해 확률적인 구조를 변형시켜 좀 더 성능이 좋은 후보해를 생성할 수 있는 확률적인 구조로 만든다. (d) 앞선 (b)~(c) 과정을 만족할만한 성능을 가진 해가 나올 때까지 반복한다. Stochastic search 알고리즘은 greedy 알고리즘보다 큰 시간복잡도(time-complexity)를 갖지만, 성능 면에서 greedy 알고리즘보다 10~15% 좋은 성능[4][5][6]을 갖는 해를 생성해 낸다. 이동성을 고려한 동적 네트워크상에서는 네트워크 위상(topology) 변화가 자주 일어나므로 broadcast 알고리즘이 주기적으로 이에 맞는 새로운 해를

생성하거나 기존의 해를 수정 또는 복구해줘야 한다. Stochastic search 알고리즘은 하나의 해를 생성하는데 많은 시간을 필요로 하기 때문에 네트워크의 위상변화에 빠르게 대처하기 힘들다. 또한 여러 후보해의 성능을 종합해 확률적인 구조를 변경하기 때문에 대개 전역적인(global) 네트워크 정보를 필요로 하므로 하모리[4][5][6] 노드의 개수가 많아질수록 해를 생성하기 위해 더 많은 정보들을 고려해야 하고 더 많은 시간을 필요로 한다. 이에 반해 greedy 알고리즘은 지역적인(local) 정보만을 이용해 해를 생성할 수 있으므로, 동적 네트워크에서 하나의 최적해를 빠르게 생성할 수 있는 알고리즘이다.

본 논문에서는 greedy 알고리즘의 시간복잡도와 비슷하면서 기존의 greedy 알고리즘에 비해 5~10% 좋은 성능의 해를 생성하고, stochastic search 알고리즘과 3% 이내의 성능차이밖에 보이지 않는 Broadcast by iterative Coverage sequence Adjustment with Hitch-hiking(BCAH) 알고리즘을 제안한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 네트워크 모델 등 주요 개념에 대해서 정리한 뒤, 본 논문에서 풀고자 하는 문제를 수학적으로 기술한다. 3장에서 BCAH의 아이디어 및 동작과정을 소개한다. 다음으로 4장에서 제안한 알고리즘의 성능을 기존 알고리즘과의 비교를 통해 실험적으로 보인다. 마지막으로 5장에서 논문의 결론을 정리한다.

2. 문제정의

2.1 Network Model

주어진 연결된(connected) 그래프 $G=(V,E)$ 에 대해 다음과 같은 용어들을 정의한다. V 는 각각의 무선 노드들의 집합을 의미하고, 네트워크상의 모든 무선 노드들의 개수는 $|V|=M$ 이다. 각각의 노드 $i, j(i, j \in V)$ 에 대하여 p_{ij} 는 임의의 노드 $i \in V$ 의 전송강도(transmission power)를 나타내고, p_{max} 는 각 노드가 낼 수 있는 최대 전송강도를 나타내며, 모든 노드들은 동일한 p_{max} 를 갖는다고 가정한다. d_{ij} 는 두 노드 i, j 간의 물리적 거리를 나타낸다. p_i 는 노드 i 가 노드 j 로 정보를 보내기 위해 필요한 노드 i 의 최소한의 전송강도를 나타내고, $p_i = c \cdot (d_{ij})^\alpha$ 로 주어진다. 여기서 c 는 상수, α 는 path loss exponent($2 \leq \alpha \leq 4$)이다[7]. 임의의 노드 $i, j(i, j \in V)$ 에 대하여

1) 이 논문은 정보통신부의 대학 기초 사업 지원에 의하여 연구되었습니다(No. B1220-0501-0272).

$p_{ij} \leq p_{\max}$ 일 경우, 노드 i 를 노드 j 의 이웃노드라 하고, 이와 같은 경우 간선(edge) $(i, j) \in E$ 가 존재한다. 노드의 커버리지(coverage)[3]는 노드가 수신한 신호의 세기를 백분율로 나타낸 것이다. 노드 i 가 노드 j 에 p_i 의 세기로 신호를 보낼 때, 노드 j 로부터 얻는 노드 i 의 커버리지, $\alpha(i, j)$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\alpha(i, j) = \begin{cases} \frac{p_i}{p_{ij}}, & p_{ij} > p_i \\ 1, & p_{ij} \leq p_i \end{cases}$$

임의의 노드 i 에 대하여 인접한 k 개의 다른 노드들 $\{i_0, i_1, \dots, i_{k-1}\}$ 이 노드 i 에 동일한 정보를 각각 $\{p_0, p_1, \dots, p_{k-1}\}$ 의 전송강도로 신호를 보낼 때, $\sum_{j=0}^{k-1} \alpha(i, j) \geq 1$ 일 경우, Maximal Ratio

Combiner(MRC)[8]를 이용해 노드 i 가 인접한 k 개의 다른 노드들 $\{i_0, i_1, \dots, i_{k-1}\}$ 이 보낸 정보를 완벽히 복원해 낼 수 있다[2]. 이 때 $\sum_{j=0}^{k-1} \alpha(i, j)$ 를 노드 i 의 커버리지라 하고, C_i 로 나타낸다. 이와 같이 MRC를 이용해 주변 노드들로부터 받은 미약한 신호를 결합해 완벽한 신호를 복원해 통신을 하는 기법을 Hitch-hiking기법[2]이라 하고, 이 기법을 사용할 경우 BIP알고리즘에 비해 약 50% 적은 전체 전송강도로 broadcast를 수행할 수 있다[2].

2.2 에너지 효율 broadcast문제

주어진 $V = \{i_0, i_1, \dots, i_{M-1}\}$ 과 $(i, j) \in E$ (노드 i 는 노드 j 의 이웃노드)로 이루어진 연결된 그래프 $G = (V, E)$ 에 대하여, 소스 노드들의 집합 $S \subseteq V (S \neq \emptyset)$ 가 존재하고 각 노드들의 전송강도를 $\{p_0, p_1, \dots, p_{M-1}\}$ 라 하자. "에너지 효율 broadcast문제"는 임의의 소스노드 $i \in S$ 에서 다른 모든 노드 $j \in V - S$ 로 정보를 전달할 수 있도록(즉, broadcast가 가능하도록)하면서, 동시에 $\sum_{i=0}^{M-1} p_i$ 를 최소화하는

$\{p_0, p_1, \dots, p_{M-1}\}$ 을 찾는 것이다.

3. BCAH 알고리즘

BCAH알고리즘은 크게 새롭게 커버할 노드를 선택하는 과정과 이렇게 선택된 노드를 이용해 적은 에너지를 소모하며 broadcast를 수행하는 coverage sequence를 찾는 coverage sequence조정과정으로 나눌 수 있다.

3.1 새롭게 커버(cover)할 노드 선택

BCAH는 MST를 생성하는 Prim's MST알고리즘[9]이 한 번에 하나의 노드를 MST에 추가하는 것과 유사하게, 매번 하나의 노드를 커버(cover)하면서 모든 노드를 커버할 때까지 동작한다. BCAH알고리즘이 새로운 노드를 선택하는 기준은 Prim's MST알고리즘과 마찬가지로 거리를 이용한다. 다만 Prim's MST알고리즘은 거리로서 간선의 가중치를 이용하지만, BCAH에서는 "coverage distance"를 metric으로 이용해 소스노드와의 coverage distance가 가장 작은 노드를 선택한다. 임의의 노드 $i, j (i, j \in V)$ 에 대하여 N_i 는 노드 i 의 이웃노드들의 집합이라고 할 때, 두 노드 i, j 사이의 coverage distance d_{ij}^c 는 다음과 같이 주어진다.

$$d_{ij}^c = \begin{cases} (d_{ij})^\alpha \cdot \left(1 - \sum_{k \in N_i} \alpha(k, j)\right), & i \in N_j \\ \infty, & i \notin N_j \end{cases}$$

즉, d_{ij}^c 는 노드 i 가 노드 j 의 커버리지를 100%로 만들기 위해 필요한 잉여 전송강도를 의미한다.

3.2 coverage sequence 조정

BCAH는 기존의 소스노드들과 새로이 선택된 노드를 이용해 각 노드들을 커버하는 순서를 다시 정한다. 이러한 각 노드들을 커버하는 순서, 즉 각 노드들의 커버리지가 100%가 되는 순서를 나타내는 수열을 coverage sequence라고 하자. t 개의 노드들의 coverage sequence은

$S_t = \{i_0, i_1, \dots, i_{t-1}\}$ 과 같이 나타내고, 이 때 S_t 는 다음 조건을 만족시켜야 한다.

- 초기노드 i_0 는 커버리지가 100%이어야 한다.(수열의 첫 번째 노드는 후속 노드들에게 전달할 정보를 완전히 갖고 있어야 한다.)
- 임의의 $k (0 \leq k \leq t-2)$ 에 대해, $p_{i_k, i_{k+1}} \leq p_{\max}$ 이 성립해야 한다.(즉, 순열에서 인접한 노드들 간의 물리적 거리는 완전한 정보를 전달할 수 있는 거리범위 이내이어야 한다.)

S_t 가 주어지면 이를 이용해 수열에 속한 각 노드들의 전송강도 $\{p_0, p_1, \dots, p_{t-1}\}$ 를 [그림 1]과 같이 결정할 수 있다.

```

assign_power( $S_t = \{i_0, i_1, \dots, i_{t-1}\}$ ) {
    for all  $k, 0 \leq k \leq t-2$ ,
        if ( $C_{i_{k+1}} \neq 1$ )
             $p_{i_k} \leftarrow \alpha_{i_k, i_{k+1}}$ 
        else
             $p_{i_k} \leftarrow 0$ 
     $p_{i_{t-1}} \leftarrow 0$ 
}
    
```

[그림 1] covering 순열을 이용한 전송강도 할당

이때, $F(S_t)$ 는 [그림 1]에서 설명한 assign_power()를 통해 $S_t = \{i_0, i_1, \dots, i_{t-1}\}$ 을 이용해 결정된 각 노드들의 전송강도의 총합, 즉 $F(S_t) = \sum_{k=0}^{t-1} p_{i_k}$ 을 의미한다. 주어진 t 개의 노드들로 만들 수 있는 모든 coverage sequence들의 집합을 S_t^* 라 할 때 최적의 전송강도를 얻을 수 있는 coverage sequence $S_t^* \in \arg \min_{S_t \in S_t} F(S_t)$ 를 구하는 것은 지수적

인 시간복잡도(exponential time-complexity)를 갖기 때문에 실질적으로 S_t^* 를 구하는 것은 불가능하다. 따라서 아래 [그림 2]와 같이 t 개의 특정 coverage sequence에 대해서만 $F(S_t)$ 를 구해 그 중에서 가장 적은 전송강도를 갖는 coverage sequence를 선택한다.

```

min_power_sequence( $S_t = \{i_0, i_1, \dots, i_{t-1}\}, i_t\)$ ) {
     $\forall i, 1 \leq k \leq t$ 
     $S_{t+1}^k = \{j_0, j_1, \dots, j_t\}$ , such that  $j_l = \begin{cases} i_l, & 0 \leq l < k \\ i_{t-1}, & k \leq l \leq t \end{cases}$ 
     $S_{t+1} \in \arg \min_{1 \leq k \leq t} F(S_{t+1}^k)$ 
    return  $S_{t+1}$ 
}
    
```

[그림 2] S_t 와 i_t 를 이용해 S_{t+1} 을 생성하는 과정

3.3 알고리즘 Description

"에너지 효율 broadcast"문제를 해결하기 위한 BCAH 알고리즘은 [그림 3]과 같다. BCAH 알고리즘은 while루프 내에서 커버리지를 100%로 만들 노드를 선택하는 과정(1)과 선택한 노드를 이용해 새로운 coverage sequence를 생성하는 과정(2)로 나눌 수 있다. 초기에 소스노드에서 broadcast를 시작하므로, $S_1 =$ (source node)로 한다. 다음으로 과정(1)을 수행하는데 i_t 는 새로이 S_t 에 추가될 노드로서 아직 커버리지가 100%가 아닌 노드 중에서 커버리지가 100%인 노드와의 coverage distance가 최소

인 노드를 선택한다. 과정(2)에서는 s_t 와 i_t 를 이용해 [그림 2]와 같이 전송강도의 총합을 최소로 만드는 s_{t+1} 을 찾는다. 네트워크의 모든 노드들의 커버리지가 100%가 될 때까지 과정(1)(2)를 반복해서 수행한다. $|V|=M$ 일 때, 과정(1)(2)를 1번 수행할 때마다 최소한 추가적으로 1개 노드의 커버리지가 100%가 되므로 위 알고리즘은 과정(1)(2)를 최대 $M-1$ 번 수행한 뒤 종료한다. BCAH알고리즘의 시간 복잡도는 $O(M^4)$ 인 것을 쉽게 알 수 있고, 이는 BIP알고리즘의 시간 복잡도[1]와 같다는 것을 알 수 있다.

```

BCAH()
  k ← 1
  st = {source node}
  while( (Ci ≠ 1), ∀i ∈ V)
    it ∈ arg mini ∈ St, i ∈ S αi ----- (1)
    st+1 = min_power_sequence( st, it ) ----- (2)
    k ← k + 1
  }
  return P(st)
    
```

[그림 3] BCAH알고리즘 Pseudocode

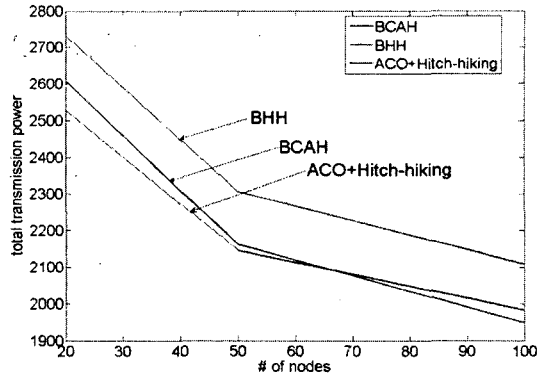
4. 실험 및 성능평가

본 논문에서 제안한 BCAH의 성능을 평가하기 위해, 기존의 greedy 알고리즘 중 뛰어난 성능을 보이는 BIP에 hitch-hiking 기법을 적용한 BHH와 기존의 stochastic search 알고리즘 중에서 ACO를 이용한 알고리즘에 hitch-hiking기법을 적용한 알고리즘을 택해 BCAH와 성능을 비교했다. 실험은 100x100인 정사각형 공간에서 20, 50, 100개의 노드들로 이루어진 무선 네트워크상에서 수행했다. 파라미터 c, α 는 기존의 논문들[1][2][3]과 같이 $c=1, \alpha=2$ 로 실험을 수행했다. [그림 4]는 노드 개수에 따른 서로 다른 100개의 네트워크에 대한, 노드들의 전송강도 총합의 평균을 각 알고리즘 별로 그래프로 나타낸 것이다. [그림 4]에서도 확인할 수 있듯이 본 논문에서 제안한 알고리즘이 BHH알고리즘에 비해 각각의 노드 개수에 대해서 평균적으로 5~10%정도 적은 전송강도를 이용해 broadcast를 수행함을 알 수 있다. 이와 동시에 ACO를 이용한 알고리즘과의 성능 차이도 3% 이내라는 것을 확인할 수 있다. [그림 5]는 각 알고리즘이 각각의 네트워크에 대해서 하나의 최중해를 생성하는데 걸리는 평균시간을 그래프로 나타낸 것이다. BHH와 BCAH알고리즘이 하나의 해를 생성하는데 걸리는 시간은 그리 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 하지만 ACO를 이용한 알고리즘은 나머지 두 알고리즘에 비해 하나의 해를 생성하는데 수백 배의 시간을 필요로 함을 알 수 있다. 이는 ACO를 이용한 알고리즘의 성능이 BCAH알고리즘에 비해 약간 더 좋지만, 하나의 해를 생성하는데 걸리는 시간을 생각하면 본 논문에서 제안한 BCAH알고리즘이 추후 이동성을 고려한 다이나믹 네트워크에 더 적합한 알고리즘이라는 것을 알 수 있다.

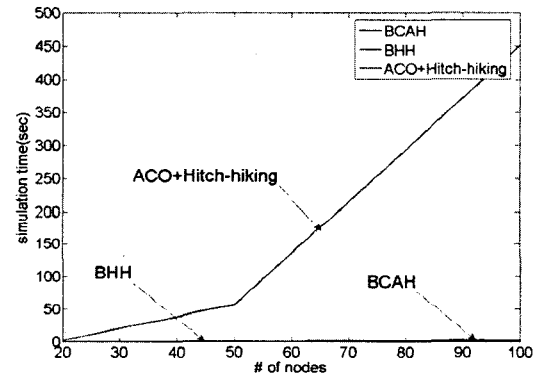
5. 결론

본 논문에서 제안한 BCAH알고리즘이 정적인 네트워크 환경에서 기존의 greedy 알고리즘과 비교해 훌륭한 성능을 낸다는 것을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 또한 stochastic search 알고리즘과 비교해도 3%이내의 성능차이 밖에 보이지 않음을 확인할 수 있다. 더욱이 stochastic search 알고리즘이 해를 생성하는데 BCAH알고리즘에 비해 수백 배의 시간을 필요로 하므로, 노드의 이동성을 고려한 동적 네트워크에서는 BCAH알고리즘이 변화하는 네트워크 위상에 보다 빠르게 대처할 수 있다.

추후 다이나믹 네트워크상에서 에너지 효율 broadcast문제를 해결하기 위해서 변화하는 네트워크 위상에 대해 기존의 해를 이용해 빠르게 새로운 해를 생성하는 알고리즘을 연구할 예정이다. 또한 분산 환경에서도 동작할 수 있도록 BCAH 알고리즘의 분산(distributed) 알고리즘 또한 연구할 예정이다.



[그림 4] 노드의 개수에 따른 전송강도의 총합



[그림 5] 노드의 개수에 따라 하나의 해를 생성하는데 걸리는 시간(초)

참고문헌

- [1] J. E. Wieselthier, G. D. Ngyugen, and A. Ephremides, "On the Construction of Energy-Efficient Broadcast and Multicast Trees in Wirelless Networks", *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 585-594, March 2000.
- [2] M. Agarwal, J. H. Cho, L. Gao, and J. Wu, "Energy efficient broadcast in wireless ad hoc networks with hitch-hiking", in *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 2097-2108, 2004
- [3] M. T. Thai, Y. Li, and D-Z Du, "A Combination of Wireless Multicast Advantage and Hitch-Hiking", *IEEE Communications Letters*, Vol. 9, No12, December 2005.
- [4] A. K. Das, R. J. Marks II, M. El-Sharkawi, P. Arabshahi, and A. Gray, "The minimum power broadcast problem in wireless networks : an ant colony system approach", in *Proc. IEEE Workshop on Wireless Communications and Networking*, 2002.
- [5] R. J. Marks II, A. K. Das, M. A. El-sharkawi, P. Arabshahi, and A. Gray, "Minimum power broadcast trees for wireless networks : Optimizing using the Viability Lemma", *Proc. of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Scottsdale, Arizona, 2002.
- [6] F. Li, S. Mannon, and A. Lippman, "Probabilistic Optimization for Energy-Efficient broadcast in all-wireless networks", *Conference on Information Sciences and Systems*, The John Hopkins University, March 16-18, 2005.
- [7] T. S. Rappaport, *Wireless Communications : Principles and Practice*, Prentice Hall, 1996.
- [8] J. G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw Hill, 2001.
- [9] E. Horowitz, S. Sahni, and S. A.-Freed, *Fundamentals of data structure in C*, Computer Science Press, 2001.